

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**DINÂMICA DA EROSÃO EM SULCOS ALTERADA PELO
INCREMENTO DA DESCARGA SÓLIDA**

GUSTAVO HENRIQUE MERTEN

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre, junho de 2000

Apresentação

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisa Hidráulica (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sob a orientação da Professora Ana Luiza de Oliveira Borges da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e co-orientação do professor José Miguel Reichert da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Parte do trabalho de pesquisa foi desenvolvido no National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL) na Purdue University, nos Estados Unidos, sob supervisão do Dr. Mark A. Nearing.

O apoio financeiro para realização do programa foi concedido pela CAPES através de bolsas de estudo do programa PICDT e de “doutorado sanduiche no exterior” pelo NSERL, através do apoio financeiro e logístico para realização do trabalho.

Por fim gostaria de agradecer de forma muito sincera a todos aqueles que de forma direta e indireta ajudaram na realização deste trabalho e também das seguintes pessoas:

- A Professora Ana Luiza de Oliveira Borges, pela dedicada orientação e apoio dispensada durante a realização do curso e do trabalho de tese.
- Ao professor José Miguel Reichert, pela orientação e sugestões ao trabalho de tese.
- Aos professores Rogério Dornelles Maestri e Paulo Kroeff de Souza, pela valiosa ajuda na construção do canal e pelas sugestões ao trabalho de tese.
- Ao professor Robin Thomas Clarke pelo auxílio nas análises estatísticas.
- Ao Dr. Mark Nearing, pelo apoio e pela dedicada orientação que recebi durante minha estada no NSERL.
- Ao Dr. Darrell Norton e todos amigos do NSERL, que ajudaram a conduzir os trabalhos experimentais realizados nos Estados Unidos.
- Ao amigo Carlos Alberto Rokenbach, pela amizade e pela imprescindível ajuda na construção do canal e na condução do experimento realizado no IPH.
- Aos amigos Jorge Tarqui, Luiz Fernando Morais, Walter Collischonn e Antônio Azevedo, pela amizade e importante ajuda na realização dos trabalhos experimentais.
- Ao bolsista de iniciação científica Bruno Collischonn, pela importante ajuda.
- Aos professores e funcionários do IPH, especialmente Nadir Solari, Jussara Silva e Jussara Barbieri.
- À Janice, Carla, parentes e amigos que me apoiaram na realização deste trabalho.

- À Elena pelo carinho e apoio recebido durante a elaboração da tese e também pela valiosa ajuda na diagramação do texto.
- Ao povo Brasileiro, que financiou minha educação e a realização deste trabalho.

Resumo

DINÂMICA DA EROSÃO EM SULCOS ALTERADA PELO INCREMENTO DA DESCARGA SÓLIDA

De acordo com a teoria corrente, a desagregação do solo ocasionada por ação do escoamento concentrado (erosão em sulco) é reduzida em função do incremento da descarga sólida. Ainda que essa hipótese seja amplamente utilizada pelos principais modelos de predição de erosão, como por exemplo: WEPP (Water Erosion Prediction Project), GUESS (Griffith University Erosion Sedimentation System) e EUROSEM (The European Soil Erosion Model), existem poucos trabalhos referentes à validação dessa hipótese e pouco se conhece sobre o mecanismo responsável pela supressão das forças erosivas causada pela presença de sedimentos no escoamento. Motivado por essas questões, este trabalho foi realizado em condições de laboratório utilizando um canal onde se procurou investigar os efeitos das adições crescentes de sedimentos sobre algumas características hidráulicas do escoamento e sobre os processos de desagregação do solo e deposição de sedimentos. Os principais resultados mostraram que a adição crescente de sedimentos provocaram alterações nas características hidráulicas do escoamento (aumento da altura da lâmina de água, redução da velocidade do escoamento e um aumento do fator perda de carga) e que as taxas de desagregação de solo e deposição de sedimentos apresentam uma forte relação de dependência com as taxas de adição de sedimentos onde verificou-se que o aumento das adições de sedimentos ao escoamento resultaram numa redução das taxas de desagregação do solo e aumento das taxas de deposição de sedimentos, conforme sugere a teoria utilizada nos modelos. Neste trabalho, verificou-se também que o mecanismo responsável pela supressão das forças erosivas que agem sobre o solo está relacionado com o efeito de proteção da superfície do solo causado pelos sedimentos em depósito e ou trânsito.

Palavras-chaves: hidráulica do escoamento concentrado, desagregação do solo, modelos de erosão.

Abstract

DYNAMICS OF RILL EROSION AS AFFECTED BY SEDIMENT LOAD

According to current theory, soil detachment in rills is reduced as the sediment load in concentrated flow increases. Although this concept is widely used by the main erosion prediction models such as WEPP (Water Erosion Prediction Project), GUESS (Griffith University Erosion Prediction Project), and EUROSEM (the European Soil Erosion Model), few references exist validating this theory, and little is known about the mechanism responsible for this suppression of erosive forces. In response to these questions, flume experiments were conducted under laboratory conditions to investigate the hydraulic effects of increasing sediment loads, as well as the processes of soil detachment and sediment deposition. Results showed that additions of sediment produced alterations in the hydraulic flow (increasing flow depth, reducing flow velocity, and increasing the Darcy-Weisbach friction factor f). Detachment and deposition rates correlated strongly with rates of sediment addition, as suggested by the theory used in the current models. As sediment was added to the flow, soil detachment rates declined and deposition rates increased. The results also demonstrated that the mechanism responsible for the suppression of erosive forces is related to protection of the soil surface provided by sediments in deposition or transit.

Key words: hydraulic concentrated flow, soil detachment, erosion models

Sumário

APRESENTAÇÃO	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. OBJETIVO GERAL.....	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. EROSIÃO EM SULCO.....	5
3.2. FORMAÇÃO DO SULCO.....	6
3.3. DESENVOLVIMENTO DO SULCO E DINÂMICA DOS PROCESSOS DE DESAGREGAÇÃO, TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO.....	8
3.4. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DO ESCOAMENTO CONCENTRADO EM SULCO E OS EFEITOS DA PRESENÇA DE SEDIMENTOS.....	11
3.5. DESAGREGAÇÃO DO SOLO.....	18
3.6. CAPACIDADE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	20
3.7. EFEITO DA DESCARGA SÓLIDA DO ESCOAMENTO SOBRE OS PROCESSOS DE DESAGREGAÇÃO E DEPOSIÇÃO.....	24
3.8. ENERGIA DO ESCOAMENTO UTILIZADA NOS PROCESSOS DE DESAGREGAÇÃO E TRANSPORTE.....	28
4. MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1. EXPERIMENTO 1: CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DO ESCOAMENTO E PROCESSO DE DESAGREGAÇÃO DO SOLO AFETADOS PELA ADIÇÃO DE SEDIMENTOS.....	32
4.1.1. <i>Equipamentos</i>	32
4.1.2. <i>Determinação da capacidade de transporte de sedimentos</i>	35
4.1.3. <i>Determinação dos efeitos de adição crescentes de sedimentos sobre as características hidráulicas do escoamento e sobre as taxas de desagregação do solo</i>	37
4.2. EXPERIMENTO 2: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PROCESSOS DE DESAGREGAÇÃO DO SOLO E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS COM ADIÇÃO DE SEDIMENTOS.....	42
4.2.1. <i>Equipamentos</i>	42
4.2.2. <i>Preparação das caixas</i>	44
4.2.3. <i>Procedimento experimental</i>	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1. EXPERIMENTO 1: CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DO ESCOAMENTO E PROCESSO DE DESAGREGAÇÃO DO SOLO AFETADOS PELA ADIÇÃO DE SEDIMENTOS.....	51
5.1.1. <i>Determinação da capacidade de transporte de sedimentos</i>	51

5.1.2.	<i>Determinação dos efeitos de adições crescentes de sedimentos sobre as características hidráulicas do escoamento.....</i>	56
5.1.3.	<i>Determinação dos efeitos de adições crescentes de sedimentos sobre o processo de desagregação do solo.....</i>	66
5.2.	EXPERIMENTO 2: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PROCESSOS DE DESAGREGAÇÃO DO SOLO E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS COM ADIÇÃO DE SEDIMENTOS.....	79
5.2.1.	<i>Avaliação do efeito da adição de sedimentos com granulometria extensa sobre os processos de desagregação do solo e de deposição de sedimentos.....</i>	79
5.2.1.1.	<i>Condições experimentais, propriedades físicas da mistura água-sedimentos e características hidráulicas do escoamento.....</i>	79
5.2.1.2.	<i>Descrição das deformações da amostra de solo após o ensaio.....</i>	82
5.2.1.3.	<i>Efeito da adição de sedimentos sobre a desagregação do solo e a deposição de sedimentos.....</i>	83
5.2.1.4.	<i>Determinação da capacidade de transporte de sedimentos.....</i>	87
5.2.1.5.	<i>Efeito da adição de sedimentos sobre a distribuição espacial das taxas de desagregação de solo e deposição de sedimentos.....</i>	90
5.2.1.6.	<i>Efeito da adição de sedimentos sobre a distribuição espacial da descarga sólida..</i>	92
5.2.1.7.	<i>Determinação do tipo de transporte das descargas sólidas medidas.....</i>	95
5.2.2.	<i>Avaliação do efeito da adição de sedimentos com granulometria uniforme na distribuição espacial das taxas de desagregação do solo e deposição de sedimentos.....</i>	97
5.2.2.1.	<i>Condições experimentais, propriedades físicas da mistura água-sedimentos e características hidráulicas do escoamento.....</i>	97
5.2.2.2.	<i>Descrição das deformações da amostra de solo após o ensaio.....</i>	99
5.2.2.3.	<i>Efeito da adição de sedimentos sobre a variação espacial das taxas de desagregação do solo e deposição de sedimentos.....</i>	100
5.3	RESUMO DOS RESULTADOS.....	105
	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	107
	REFERÊNCIAS.....	109

Lista de tabelas

Tabela 4.1	Condições experimentais dos ensaios onde foram adicionados sedimentos de granulometria extensa e uniforme.....	45
Tabela 5.1	Características hidráulicas e determinação do tipo de transporte de sedimentos para condições de 3% de declive.	51
Tabela 5.2	Valores de vazão (Q), descarga sólida (q_s) injetada e massa de sedimento transportados e depositada para as diferentes vazões ensaiadas	52
Tabela 5.3	Condições experimentais utilizadas, propriedades físicas da água e regime do escoamento	57
Tabela 5.4	Características hidráulicas medidas e velocidades estimadas pela altura da lâmina de água e pela equação do perfil logarítmico	58
Tabela 5.5	Fator perda de carga (f) em função das adições de sedimentos	61
Tabela 5.6	Características hidráulicas derivadas e tipo de transporte de sedimentos	64
Tabela 5.7	Efeito da adição de sedimentos sobre a taxa de desagregação do solo para uma condição de $Q=0,0016 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $I=0,03 \text{ m m}^{-1}$	67
Tabela 5.8	Condições experimentais utilizadas para adições de sedimentos com granulometria extensa	80
Tabela 5.9	Propriedades físicas da mistura de água-sedimento para condição de adições de sedimentos com granulometria extensa e temperatura de 20°C (valores representam uma média de três repetições).	80
Tabela 5.10	Características hidráulicas do escoamento para mistura de água-sedimentos para condição de adição de sedimentos com granulometria extensa e temperatura de 20°C (valores representam uma média de três repetições).	80

Tabela 5.11	Efeito da adição de sedimentos com granulometria extensa sobre a desagregação, a deposição total, o comprimento necessário para início de deposição e a granulometria do sedimento ($Q_{\text{entrada}}=0,000122\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).....	84
Tabela 5.12	Granulometria dos sedimentos do material coletado e de fundo (valores representam uma média de três repetições).	87
Tabela 5.13	Porcentagem em peso das diferentes classes de sedimentos transportados em função das taxas de adição de sedimentos.	96
Tabela 5.14	Tipo de transporte dos sedimentos presentes na descarga sólida para diferentes taxas de adição de sedimentos.	96
Tabela 5.15	Tipo de transporte dos sedimentos presentes na descarga sólida para as diferentes taxas de adição de sedimentos.	96
Tabela 5.16	Condições experimentais utilizadas no ensaio com adição de sedimentos de granulometria extensa.	98
Tabela 5.17	Propriedades físicas da mistura de água e sedimentos do ensaio com adição de sedimentos de granulometria extensa.	98
Tabela 5.18	Características hidráulicas do escoamento para uma mistura de água e sedimentos do ensaio com adição de sedimentos de granulometria uniforme ...	98
Tabela 5.19	Efeito da adição de esferas com granulometria equivalente a silte e areia grossa nas condições hidráulicas do escoamento, e na desagregação e deposição total e no comprimento para início de deposição	104

Lista de figuras

Figura 3.1	Esquema de um corte transversal mostrando as correntes secundárias onde em (a) é mostrado as linhas de fluxo transversais das correntes, (b) representa as linhas de fluxo sendo transferidas da superfície para o fundo e o início da formação da fossa e (c) evolução da fossa para o sulco	8
Figura 3.2	Esquema adaptado do modelo teórico da relação desagregação de solo e transporte de sedimentos proposto por Foster e Meyer (1972).....	9
Figura 3.3	Esquema adaptado do modelo teórico para dinâmica dos processos de erosão e sedimentação proposto por Hairsine e Rose (1972).....	11
Figura 3.4	Diagrama de utilização da energia do escoamento pelos diferentes processos relacionados com a erosão em sulco.....	29
Figura 3.5	Representação esquemática adaptada da utilização da energia do escoamento para os processos de erosão do solo conforme o modelo teórico de Hairsine e Rose (1992).....	30
Figura 4.1	Foto com vista geral do canal.....	33
Figura 4.2	Foto com detalhe do reservatório localizado à montante do canal para manter um fornecimento de água em condição de carga constante (a), ponta linimétrica para ajuste da vazão no vertedor (b) e colmeia para tranquilização do escoamento (c).....	34
Figura 4.3	Foto do sistema de abastecimento sólido e distribuidor de sedimentos	34
Figura 4.4	Esquema, em planta, da localização dos diferentes elementos que compõem o canal e dos locais das medições.....	35
Figura 4.5	Detalhes dos cilindros sendo preparados	40
Figura 4.6	Cilindros contendo agregados classe inferior a 1mm sendo umedecidos.....	40
Figura 4.7	Fundo do canal mostrando o local de colocação do cilindro	40

Figura 4.8	Vista, sob o canal, do local de colocação do cilindro.....	41
Figura 4.9	Distanciômetro a laser e grade para orientação das leituras utilizados para o levantamento da morfologia da superfície dos cilindros.	41
Figura 4.10	Esquema, em planta, da disposição das caixas formando o canal.....	43
Figura 4.11	Seqüência de caixas e conjunto silo distribuidor de sedimentos montadas sobre um canal de declividade variável.	43
Figura 4.12	Detalhes da caixa de mistura do escoamento com sedimentos mostrando a mangueira para entrada de água (a), a malha plástica (b), colmeia (c), o local de mistura do escoamento com sedimento (d) e o distribuidor de sedimentos (e).....	44
Figura 4.13	Sistema de caixas sendo saturado no canal.....	46
Figura 4.14	Calibração da vazão efetuada em cada ensaio	47
Figura 4.15	Calibração da descarga sólida efetuada em cada ensaio.....	48
Figura 4.16	Amostragem do escoamento em recipientes plásticos para determinação da concentração de sedimentos.....	48
Figura 4.17	Determinação da a velocidade do escoamento com uso da tinta traçadora.....	49
Figura 4.18	Separação das caixas para serem colocadas em estufa.....	49
Figura 5.1	Relação entre a vazão e a porcentagem de depósito para uma condição de declive de 3%	53
Figura 5.2	Efeito da adição de sedimentos no escoamento sobre a altura do escoamento para $Q=0,0016\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$	59
Figura 5.3	Gráfico da relação entre descarga sólida equivalente a capacidade de transporte e a porcentagem da resistência do escoamento devido ao transporte de sedimentos.....	63

- Figura 5.4 Desenho esquematizando a ação das correntes secundárias agindo sobre a superfície do solo dentro do cilindro e o efeito de proteção proporcionado pelos sedimentos depositados sobre a fossa e em trânsito..... 69
- Figura 5.5 Sequência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaio no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=0\text{g s}^{-1}$, $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ 69
- Figura 5.6 Sequência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaio no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=10,4\text{g s}^{-1}$, $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ 70
- Figura 5.7 Sequência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaios no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=16,0\text{g s}^{-1}$, $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ 70
- Figura 5.8 Sequência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaio no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=26,1\text{g s}^{-1}$, $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ 71
- Figura 5.9 Sequência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaios no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=35,3\text{g s}^{-1}$, $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ 71
- Figura 5.10 Sequência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaios no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=47,2\text{g s}^{-1}$, $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ 72
- Figura 5.11 Sequência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaio no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=61,1\text{g s}^{-1}$, $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ 72
- Figura 5.12 Sequência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaios no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=75,5\text{g s}^{-1}$, $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ 73

- Figura 5.13 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, $q_s=0\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento 74
- Figura 5.14 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, $q_s=10,4\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento 75
- Figura 5.15 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, $q_s=16\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento 75
- Figura 5.16 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, $q_s=26,1\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento 76
- Figura 5.17 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, $q_s=35,3\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento 76
- Figura 5.18 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, $q_s=47,2\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento 77
- Figura 5.19 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, $q_s=61,1\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento 77

Figura 5.20	Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, $q_s=75,5\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento	78
Figura 5.21	Efeito da adição de sedimento de granulometria extensa sobre a concentração de sedimentos (os diferentes pontos indicam as repetições realizadas)	85
Figura 5.22	Efeito da adição de sedimentos de granulometria extensa sobre a desagregação total (os diferentes pontos indicam as repetições realizadas).....	85
Figura 5.23	Efeito da adição de sedimentos de granulometria extensa sobre a deposição total (os diferentes pontos indicam as repetições realizadas)	86
Figura 5.24	Efeito da adição de sedimentos de granulometria extensa sobre o comprimento para início de deposição (os diferentes pontos indicam as repetições realizadas).....	86
Figura 5.25	Efeito da adição de sedimentos de granulometria extensa sobre a desagregação e deposição total do solo	89
Figura 5.26	Efeito da adição de sedimentos de granulometria extensa sobre a descarga sólida (cada ponto representa uma média de três repetições)	89
Figura 5.27	Efeito das adições de sedimento de granulometria extensa sobre a distribuição espacial das taxas de desagregação de solo e deposição de sedimentos	92
Figura 5.28	Descarga sólida estimada distribuída ao longo do canal para as diferentes taxas de adição de sedimentos para um $Q=0,000122\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, $I=0,05\text{m m}^{-1}$ e $T_c=5,2\text{g s}^{-1}$	93
Figura 5.29	Resultado das simulações da descarga sólida prevista pela equação 5.13 para adições crescentes de sedimentos para um $Q=0,000122\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, $I=0,05\text{m m}^{-1}$ e $T_c=5,2\text{g s}^{-1}$ para adições crescentes de sedimentos	94

- Figura 5.30 Taxa de desagregação e deposição de solo em função das adições de $0,9\text{g s}^{-1}$ de esferas de granulometria fina e grosseira e água sem sedimento 101
- Figura 5.31 Taxa de desagregação e deposição de solo em função das adições de 3g s^{-1} de esferas de granulometria fina e grosseira, água sem sedimento e sedimentos de granulometria extensa a uma taxa de adição de $3,9\text{g s}^{-1}$ 102

Lista de símbolos

Símbolos gregos

α	fator de correção de velocidade proposto por Li e Atkinson (1996)	
γ	peso específico da água	(N m ⁻³)
γ_s	peso específico dos sedimentos	(N m ⁻³)
γ_m	peso específico da mistura	(N m ⁻³)
κ	constante de von Karman	
μ	viscosidade dinâmica	(N s m ⁻²)
μ_m	viscosidade dinâmica da mistura	(N s m ⁻²)
ν	viscosidade cinemática	(m ² s ⁻¹)
ν_m	viscosidade cinemática da mistura	(m ² s ⁻¹)
ρ	massa específica	(kg m ⁻³)
ρ_m	massa específica da mistura	(kg m ⁻³)
ρ_s	massa específica das partículas sólidas	(kg m ⁻³)
ω	potência unitária do escoamento	(m s ⁻¹)
ω_c	potência unitária crítica	(m s ⁻¹)
Ω	potência do escoamento	(kg s ⁻¹)
Ω_c	potência crítica do escoamento	(kg s ⁻¹)
τ	tensão cisalhante do escoamento	(N m ⁻²)
τ_c	tensão crítica	(N m ⁻²)

Símbolos

C	coeficiente de rugosidade de Chèzy	
F	fração efetiva da diferença entre potência e potência crítica do escoamento disponível para o processo de desagregação de solo ou início de movimento dos sedimentos depositados	
Fr	número de Froude	
f	fator de perda de carga de Darcy-Weisbach	
g	aceleração da gravidade	(m s ⁻²)
h	altura do escoamento	(m)
H	fração da superfície do solo protegida pelo depósito de sedimentos	
I	declividade	(m m ⁻¹)
J	quantidade de potência unitária do escoamento necessária para desagregar uma unidade de massa	(m s ⁻¹)
n	coeficiente de rugosidade de Manning	(s m ^{1/3})
Q	vazão	(m ³ s ⁻¹)

q	vazão unitária	(m ² s ⁻¹)
R	raio hidráulico	(m)
Re	número de Reynolds	
u	velocidade instantânea	(m s ⁻¹)
v	velocidade média do escoamento	(m s ⁻¹)
Y	tensão cisalhante adimensionalizada	
w	largura do escoamento	(m)

Símbolos subscrito e sobrescrito

D _i	taxa de deposição de sedimentos	(g cm ² s ⁻¹)
d _f	granulometria referente a rugosidade de grãos	(μm)
d ₅	diâmetro para o qual 5% do peso do material são mais finos	(μm)
d ₁₀	diâmetro para o qual 10% do peso do material são mais finos	(μm)
d ₅₀	diâmetro para o qual 50% do peso do material são mais finos	(μm)
d ₉₀	diâmetro para o qual 90% do peso do material são mais finos	(μm)
C _{g/l}	concentração de sedimentos em gramas por litro	(g l ⁻¹)
C _v	concentração volumétrica de sedimentos	
D _c	taxa máxima de desagregação do solo	(g cm ² s ⁻¹)
D _r	taxa de desagregação do solo	(g cm ² s ⁻¹)
F	fração do excesso da potência do escoamento que é usada para desagregação	
f _s	fator de perda de carga de Darcy-Weisbach referente à presença de sedimentos	
f _t	fator de perda de carga de Darcy-Weisbach referente à presença de sedimentos e rugosidade de fundo	
K _r	erodibilidade do solo em sulcos	(s m ⁻¹)
g _v	descarga sólida por volume por unidade de largura	(m ² s ⁻¹)
p ₀	porosidade	(m ³ m ⁻³)
q _s	descarga sólida	(g s ⁻¹)
R _g	raio hidráulico do grão	(m)
R _f	raio hidráulico de forma	(m)
r _{ei}	desagregação do meio coesivo causado pelo escoamento	(g cm ⁻² s ⁻¹)
r _{gi}	desagregação do meio coesivo causado pela ação da gravidade através da erosão regressiva e do solapamento	(g cm ⁻² s ⁻¹)
r _{ri}	ressuspensão de sedimentos em repouso sobre o solo	(g cm ⁻² s ⁻¹)
T _c	capacidade de transporte de sedimentos	(g s ⁻¹)
T ⁰	temperatura	(°C)
v _s	velocidade de sedimentação	(m s ⁻¹)

∇_v	volume de vazios	(m ³)
∇_t	volume total	(m ³)
y_0	é a distância em relação ao fundo onde a velocidade dada pelo perfil de velocidades é igual a zero	(m)

1. Introdução

O processo de erosão hídrica é composto de três etapas que pode ocorrer simultaneamente em um trecho: desagregação, transporte e deposição. A erosão é considerada como um dos principais fatores que contribuem para a degradação ambiental. A remoção dos sedimentos e seu transporte para as áreas de drenagem provocam a redução da capacidade produtiva dos solos nas vertentes e o assoreamento e a contaminação nos rios e reservatórios. Por essa razão, o entendimento dos processos envolvidos na dinâmica da erosão hídrica, especialmente a determinação da capacidade do escoamento em desagregar e transportar sedimentos, é fundamental para modelagem matemática desses processos e para o estabelecimento de medidas de controle da erosão e sedimentação. É necessário considerar entretanto que, mesmo que as conseqüências da erosão sejam reconhecidas como impactantes ao ambiente, até o presente momento, não se conhecem de forma detalhada os mecanismos envolvidos nesse processo, cuja natureza é complexa, envolvendo diferentes campos da ciência, tais como solos, mecânica de fluidos e hidráulica.

No final da década de quarenta, nos Estados Unidos, iniciaram-se os primeiros estudos de mecânica da erosão hídrica. Esses estudos, ainda que incipientes, foram bastante avançados para a época e contemplaram os principais aspectos referentes aos processos de erosão em entressulcos e em sulcos. Infelizmente nos anos seguintes (décadas de cinquenta, sessenta e parte dos anos setenta), os estudos relacionados à mecânica de erosão não tiveram continuidade, pois grande parte dos esforços daqueles que trabalhavam nesse tema foram concentrados para o desenvolvimento da Equação Universal de Perda de Solo (USLE). Essa equação foi desenvolvida a partir do tratamento estatístico dos dados referentes a parcelas de perda de solo implantadas em diferentes locais dos Estados Unidos. A USLE foi, e continua sendo, uma ferramenta bastante útil para cumprir a finalidade para a qual foi proposta inicialmente, qual seja, apoio ao planejamento conservacionista de propriedades agrícolas. Porém, os esforços para o seu desenvolvimento não contribuíram para o avanço dos conhecimentos relacionados à mecânica da erosão.

Ao final da década de setenta e início da década de oitenta, nos Estados Unidos e na Europa, as atividades agrícolas foram identificadas como a principal fonte de contaminação dos recursos hídricos em função dos sedimentos e dos agroquímicos que eram removidos e transportados pelo escoamento das lavouras para a calha dos rios. Esse problema mobilizou a comunidade científica para desenvolver modelos matemáticos capazes de preverem não

somente a perda de solo total, mas também o transporte e a deposição dos sedimentos no trecho compreendido entre a vertente e a calha do rio. A partir desses esforços, na década de oitenta, surge a segunda geração de modelos de predição de erosão baseados nos processos físicos envolvidos como o WEPP (Water Erosion Prediction Project), GUESS (Griffith University Erosion Sedimentation System) e EUROSEM (European Soil Erosion Model). Esses modelos tinham como objetivo substituir os modelos empíricos e incorporar os novos conhecimentos referentes à mecânica da erosão. De uma maneira geral, os modelos físicos de predição de erosão separam os processos erosivos em erosão em entressulcos (causada pelo impacto das gotas da chuva) e em sulcos (causada pelo escoamento).

O processo de erosão da região do entressulco tem sido bastante estudado, sendo esse conhecimento incorporado aos modelos, conferindo confiabilidade à modelagem desse processo. Por outro lado, os mecanismos envolvidos no processo de erosão em sulcos são pouco conhecidos devido ao pouco avanço das pesquisas relacionadas a esse tema. Assim, alguns conceitos utilizados para modelagem da erosão e transporte de sedimentos no sulco foi transposta da mecânica fluvial (parte da hidráulica que lida com a modelagem do escoamento concentrado em rios e canais de fundo móvel). Sabe-se, no entanto, que as condições do escoamento em um canal aluvial são bastante diferentes daquelas que ocorrem no sulco, onde a lâmina de água é de pequena espessura e a declividade do fundo é muito acentuada. Devido a esses aspectos, é sensato pensar que não é possível simplesmente adaptar os conhecimentos da mecânica fluvial para as condições do escoamento em sulco sem que sejam feitos estudos que respaldem ou não os fundamentos utilizados pelos modelos de predição de erosão. Esse é o caso típico das equações de transporte de sedimentos que foram desenvolvidas para condições de canais aluviais e são utilizadas nos modelos de predição de erosão para estimar a capacidade de transporte, possibilitando a modelagem do processo de desagregação e deposição de sedimentos. Também parece óbvio que o conhecimento dos processos envolvidos na erosão em sulcos dependem de uma abordagem onde sejam contemplados aspectos relacionados à caracterização hidráulica do escoamento e sua interação com o solo, permitindo definir relações que possam ser utilizadas na predição da erosão do solo.

Considera-se, atualmente, que um dos aspectos mais importantes a serem entendidos na dinâmica da erosão em sulcos diz respeito ao efeito da carga de sedimentos transportada sobre as taxas de desagregação de solo e deposição de sedimentos. Nos modelos físicos de predição de erosão de uma forma geral é considerado que as taxas de desagregação de solo são função da diferença entre a capacidade de transporte e a carga sólida sendo transportada e

que o aumento da descarga sólida reduz as taxas de desagregação do solo. No entanto, é interessante verificar que mesmo sendo reconhecida a importância desses aspectos, são escassos os trabalhos que procuram estudar e validar esse conceito teórico.

Por outro lado, para explicar como adições crescentes de sedimentos reduzem as taxas de desagregação de solo é especulado que a descarga sólida atenua as forças erosivas que agem sobre a superfície do solo por efeitos de proteção física proporcionado pelos depósitos ou sedimentos em trânsito e também pelos efeitos de alteração da turbulência do escoamento causada pelos sedimentos em suspensão.

Com base nessas considerações, foram elaboradas as seguintes hipóteses:

- *A taxa de desagregação do solo é dependente da descarga sólida de forma que adições crescentes de sedimentos são capazes de reduzir a taxa de desagregação e aumentar as taxas de deposição de sedimentos;*
- *Adições de sedimentos com granulometria uniforme transportados preferencialmente por arraste ou por suspensão têm um efeito diferenciado na supressão do processo de desagregação do solo.*

Para testar essas hipóteses, realizaram-se dois experimentos onde foram adaptados métodos de laboratório capazes de reproduzir a ação erosiva do escoamento transportando sedimentos, sobre o meio coesivo.

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral:

Este trabalho teve como objetivo geral estudar a relação entre a descarga sólida presente no escoamento e o processo de desagregação do solo em sulcos.

2.2. Objetivos específicos:

- Testar e adaptar métodos de laboratório para estudar a ação erosiva do escoamento concentrado sobre o meio coesivo;
- Avaliar os efeitos da adição de sedimentos sobre a hidráulica do escoamento;
- Medir os efeitos da adição crescente de sedimentos sobre as taxas de desagregação de solo e deposição de sedimentos;
- Validar a teoria corrente, utilizada por alguns modelos de predição de erosão, que relaciona as taxas de desagregação com a descarga sólida;
- Estudar os mecanismos envolvidos na supressão das forças de desagregação causada pela presença de sedimentos no escoamento.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Erosão em sulcos

A erosão hídrica do solo é um processo provocado por agentes erosivos como a precipitação pluvial e o escoamento superficial, consistindo de três fases: (a) destacamento de partículas a partir da massa do solo; (b) transporte dessas partículas; (c) deposição das partículas. Para facilitar o entendimento dos processos envolvidos, Meyer et al. (1975) sugeriram separar a erosão em entressulcos e em sulcos. A erosão em entressulcos é aquela em que o agente erosivo responsável pela desagregação é a precipitação pluvial e a fonte de sedimentos é formada basicamente por materiais da superfície do solo. Já na erosão em sulcos, o agente erosivo responsável pela desagregação e pelo transporte é o escoamento concentrado que, sendo esse profundo o suficiente, protege a superfície do solo contra o impacto da gota da chuva, enquanto que a fonte de sedimentos são seus horizontes superficiais e subsuperficiais (Bryan, 1987).

Sob o enfoque agrícola, os sulcos são definidos como pequenos e efêmeros canais, que podem ser eliminados pelas operações de preparo do solo. Por outro lado, segundo Bryan (1987), sob o ponto de vista geomorfológico, os sulcos são considerados como modeladores das feições geomorfológicas das vertentes, condutores de água e sedimento (que poluem os corpos de água) e também um sistema embrionário de drenagem, conforme sugerido por Horton (1945).

Considera-se, atualmente, que a mecânica da erosão em entressulcos tem sido razoavelmente bem estudada, enquanto que menor atenção tem sido dispensada à compreensão dos mecanismos envolvidos na erosão em sulcos. Segundo Govers (1996), as pesquisas voltadas para a construção do conhecimento dos processos de erosão em sulcos deveriam ser orientadas para a busca de respostas a três questões fundamentais: (a) Quando e como se forma o sulco? (b) Quanto sedimento pode ser transportado pelo escoamento no sulco? (c) Quanto sedimento pode ser destacado pelo escoamento no sulco?

3.2. Formação do sulco

A formação do sulco em uma vertente ocorre quando o escoamento reúne algumas condições que possibilitam a incisão do solo. Merrit (1984), utilizando um canal de laboratório e trabalhando com amostras de solo tipo areno siltoso, procurou determinar os processos envolvidos no início da formação do sulco. Nesse trabalho foi identificado que o processo de formação do sulco pode ser dividido em quatro etapas: a) fase do escoamento superficial difuso; b) fase do escoamento superficial concentrado em caminhos preferenciais; c) fase da formação de micro-canais sem erosão regressiva (“headcuts”); d) fase da formação dos canais após ocorrência da erosão regressiva. De acordo com as observações realizadas pelo autor, na primeira fase, o escoamento superficial era difuso e do tipo laminar, enquanto que, na segunda fase, o escoamento ainda permanecia laminar, mas apresentava a tendência de se concentrar em minúsculos canais que se formavam em pontos aleatórios, considerados como sistemas de sulcos incipientes. Na terceira fase, o escoamento concentrado em micro-canais tornava-se supercrítico e mais turbulento devido aos focos de turbulência gerado junto às ondulações formadas no fundo. Por sua vez o aumento da turbulência do escoamento ocasionou a formação de pequenas fossas e erosões regressivas. Na última fase de formação do sulco, o autor pode verificar que o canal se tornava mais largo e profundo em função da propagação à montante da erosão regressiva.

O processo de formação do sulco em meio não coesivo e plano foi estudado por Rauws (1987) que verificou para declives maiores que 2° a 3°, o sulco era formado a partir de locais onde ocorria a erosão regressiva e a velocidade de cisalhamento (u_*) era superior a $0,032\text{m s}^{-1}$. O regime do escoamento nessas condições era de transição, sendo possível observar o aparecimento de pequenos vórtices, os quais, nas maiores descargas líquidas, evoluíam para focos de turbulência que se formavam de maneira espontânea no tempo e no espaço. Nesse trabalho é comentado também que a velocidade de cisalhamento (u_*) é um parâmetro que está relacionado com tensão aparente de cisalhamento causada devido às flutuações de velocidade. Dessa maneira, supõe-se que de alguma forma a velocidade de cisalhamento estaria associada à geração dos focos de turbulência e, por isso, seria considerada adequada para representar a condição hidráulica no início da formação do sulco.

O início da formação do sulco foi relacionado também por Slattery e Bryan (1992) com o processo de erosão regressiva observada quando o escoamento encontra-se em um regime supercrítico. Por outro lado, foi verificado que a formação do escoamento supercrítico

é facilitada pela condição de suavização da superfície do solo proporcionada pela remoção e redistribuição dos sedimentos depositados.

A partir de experimentos realizados em laboratório e observações de campo e trabalhando com solos, francos Govers (1985) verificou que, nas condições onde o escoamento apresentava uma velocidade de cisalhamento superior a $0,03$ a $0,035 \text{ m s}^{-1}$, ocorria um aumento substancial da capacidade de transporte de sedimentos e, dessa maneira, o escoamento tornava-se capaz de transportar sedimentos de todos os tamanhos. O autor associou essa condição à fase de início de formação do sulco, supondo que o processo de incisão do solo só poderá ocorrer quando o escoamento conseguir remover, com a mesma facilidade, todos os tamanhos de partículas que compõem o solo.

A presença de correntes secundárias foi relacionada por Moss et al. (1982) com o início de formação do sulco. Segundo estes autores, a presença dessas correntes se formam nos escoamentos supercríticos e com pequena espessura de lâmina de água. Esse tipo de escoamento é caracterizado por ser altamente sensível às perturbações causadas pela rugosidade do fundo e, conseqüentemente, apresenta um alto gradiente no perfil de velocidades, o qual favorece a formação das correntes secundárias. As correntes secundárias consistem em linhas de fluxo de água direcionadas para o fundo do canal e outras direcionadas para a superfície. Essa condição, associada aos perfis de velocidade com forte gradiente, favorece a transferência muito rápida do escoamento da superfície (dotado de alta velocidade) para o fundo (Figura 3.1b). Esse processo de transferência de energia cinética favorece a formação de fossas localizadas que evoluem e formam os sulcos (Figura 3.1c).

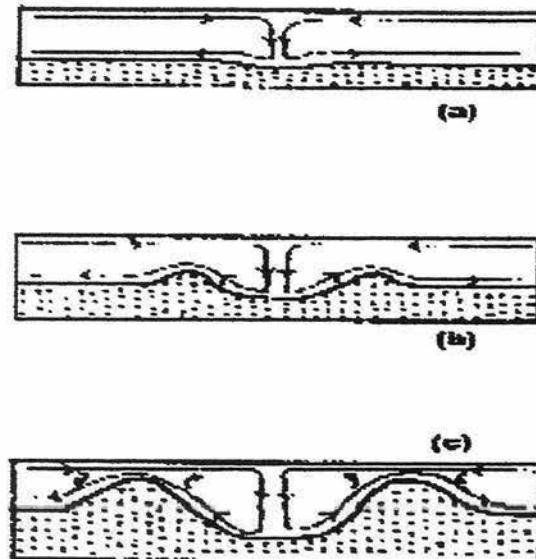


Figura 3.1 Esquema de um corte transversal mostrando as correntes secundárias onde em (a) são mostradas as linhas de fluxo das correntes, (b) representa as linhas de fluxo sendo transferidas da superfície para o fundo e o início da formação da fossa e (c) evolução da fossa para o sulco. Fonte: (Adaptado de Moss et al., 1982, p.404)

3.3. Desenvolvimento do sulco e dinâmica dos processos de desagregação, transporte e deposição

Uma vez iniciado o sulco, o mesmo evolui para montante através da erosão regressiva e para jusante através do processo erosivo, função do balanço entre tensão cisalhante do escoamento que atua sobre o fundo e a resistência oferecida pelo contorno sólido. A erosão regressiva por sua vez depende do grau de coesão do solo, da velocidade e da descarga líquida do escoamento e da altura e do ângulo da descontinuidade formada na fossa que desencadeia a erosão regressiva (Morgan, 1995).

Durante o desenvolvimento do sulco, os processos de desagregação, transporte e deposição ocorrem de forma dinâmica e interativa. Para explicar a dinâmica desses processos, serão apresentados modelos teóricos como o de Foster e Meyer (1972a) e de Hairsine e Rose (1992), os quais se constituem em base teórica para os modelos de previsão de erosão WEPP (Water Erosion Prediction Project) (Nearing et al., 1989) e GUESS (Griffith University Erosion Sedimentation System) (Morgan, 1995). O modelo de Foster e Meyer (1972a) que está representado na Figura 3.2 propõe que, na condição de um escoamento permanente uniforme em canal infinitamente longo, o escoamento livre de sedimento que entra na seção

erodível de um canal é capaz de desagregar o solo na sua máxima condição (capacidade de desagregação). Com a propagação do escoamento para jusante, ocorre um aumento da carga de sedimento transportada e, com isso, as taxas de desagregação são reduzidas, podendo chegar a zero. Nessa condição, considera-se que o escoamento atingiu a capacidade de transporte e, dessa forma, no trecho estável não deverá ocorrer nem desagregação nem deposição. Por outro lado, havendo adição de sedimento (contribuição das áreas de entressulco, por exemplo) em quantidades superiores à capacidade de transporte, haverá deposição do excesso de material. Nesse modelo conceitual, considera-se que um escoamento que transporta uma grande carga de sedimentos é menos erosivo que um outro que transporta uma pequena carga de sedimentos. A dependência entre a taxa de desagregação do solo, a carga de sedimento transportada e a capacidade de transporte do escoamento é considerada na rotina de cálculo da erosão em sulco do modelo WEPP (Nearing et al., 1989):

$$\frac{D_r}{D_c} + \frac{q_s}{T_c} = 1 \quad 3.1$$

onde, D_r é a taxa de desagregação do solo pelo escoamento ($\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-2}$), D_c é a taxa máxima de desagregação do solo pelo escoamento ($\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-2}$), q_s é a descarga de sedimento transportada pelo escoamento ($\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-1}$) e T_c é a capacidade de transporte de sedimento pelo escoamento ($\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-1}$). Pela equação 3.1, verifica-se que a taxa máxima de desagregação de solo pelo escoamento é função da capacidade de transporte de sedimento, enquanto que a taxa de desagregação é dependente da diferença entre a capacidade de transporte e da descarga de sedimento que esta sendo transportada.

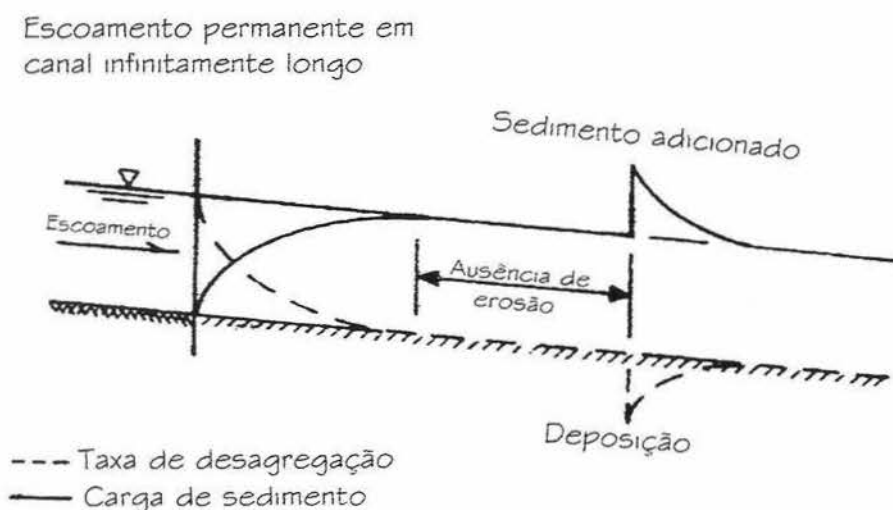


Figura 3.2 Esquema adaptado do modelo teórico da relação desagregação de solo e transporte de sedimentos proposto por Foster e Meyer (1972a).

O modelo de Hairsine e Rose (1992) diferencia-se do modelo de Foster e Meyer (1972a) por considerar que os processos de desagregação, transporte e deposição ocorrem de forma simultânea. Esse modelo admite que variáveis como altura da lâmina de água, camada de sedimento em depósito sobre o fundo e concentração de sedimentos encontram-se em equilíbrio dinâmico. Na condição de equilíbrio, a concentração de sedimentos é mantida constante em decorrência da interação de quatro processos conforme descrição do diagrama da Figura 3.3: (a) desagregação do meio coesivo causado pelo escoamento (r_{ei}); (b) desagregação do meio coesivo causado pela ação da gravidade através da erosão regressiva e solapamento (r_{gi}); (c) resuspensão de sedimentos em repouso sobre o solo (r_{ri}); (d) deposição de sedimentos (d_i).

Ambos os modelos (Foster e Meyer, 1972a e Hairsine e Rose, 1992) produzem resultados similares em termos de desagregação de solo e descarga sólida como função da distância conforme pode ser visto pela Figura 3.2. De acordo com essa Figura, verifica-se que os modelos predizem uma redução exponencial das taxas de desagregação em função da distância no sulco. Já em relação à descarga sólida como função da distância no sulco, os modelos predizem uma curva com crescimento exponencial até um determinado limite que depois passa a ser constante. No momento em que a curva passa a ser constante considera-se que a descarga sólida atingiu uma concentração de equilíbrio. Esse momento é interpretado, no modelo de Foster e Meyer (1972a), como a situação onde é atingida a capacidade de transporte e a energia do escoamento é utilizada exclusivamente para o transporte de sedimentos (portanto, não deverá ocorrer desagregação). No caso do modelo de Hairsine e Rose (1992), a interpretação é diferente pois na concentração de equilíbrio significa que a superfície do solo, sujeita à desagregação, está coberta por sedimentos em trânsito ou depositados e portanto protegida contra ação das forças de desagregação que agem sobre a superfície do solo e que as taxas de deposição são iguais as taxas de resuspensão dos sedimentos em repouso.

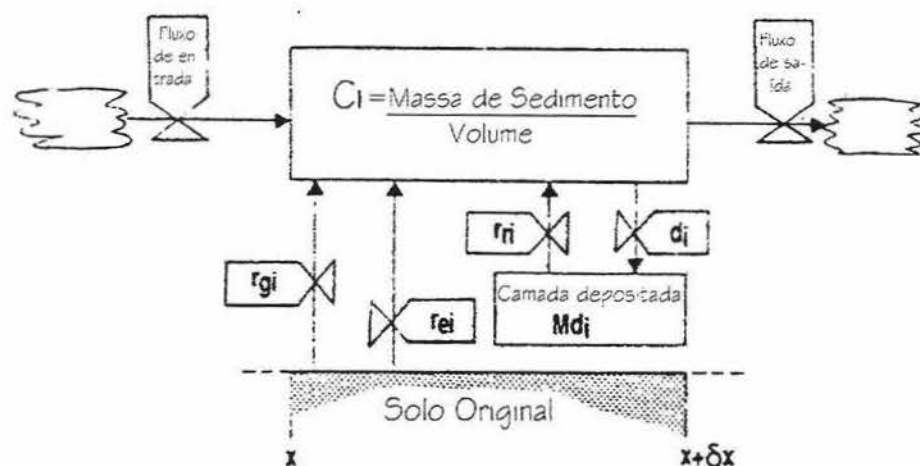


Figura 3.3 Esquema adaptado do modelo teórico para dinâmica dos processos de erosão e sedimentação proposto por Hairsine e Rose (1992).

3.4. Características hidráulicas do escoamento concentrado em sulco e os efeitos da presença de sedimentos

O escoamento concentrado em sulcos caracteriza-se por apresentar, sob condição de declividade acentuada, lâmina de água na ordem de centímetros ou menos gerando com isso escoamentos com regime hidráulico do tipo supercrítico de transição ($500 < Re < 2000$ e $Fr > 1$) ou supercrítico turbulento ($Re > 2000$ e $Fr > 1$). Assim sendo, as condições hidráulicas de um escoamento concentrado nos sulcos é diferente da condição que ocorre nos rios e canais, onde a lâmina de água é maior e a declividade menor. Outra diferença entre os escoamentos em rios/canais e em sulcos diz respeito à escala temporal em que ocorrem os processos de deformação do contorno sólido: ela é muito menor nos sulcos (ordem de segundos) do que nos rios (Nearing et al., 1997). Além de se caracterizarem por apresentar um perfil longitudinal e uma seção transversal irregulares, as deformações do contorno sólido alteram continuamente a morfologia do sulco e, conseqüentemente, as condições hidráulicas do escoamento e os processos a ela relacionados, como a desagregação, o transporte e a deposição.

As alterações hidráulicas ocorrem, principalmente, por efeitos de resistência do contorno sólido ao escoamento, causados pela rugosidade dos grãos e das formas de fundo e, também, pelo trânsito de sedimentos e pelo impacto das gotas de chuva contra o escoamento (Abrahams e Li, 1998). A resistência exercida pelos grãos e microagregados é resultante da

tensão cisalhante do escoamento e das flutuações de pressão do escoamento junto ao fundo. Já a resistência de forma ocorre devido aos elementos que compõem a macrorugosidade do sulco, tais como pedras, resíduos orgânicos, vegetação, protuberâncias da microtopografia, fossas formadas pela desagregação e depósitos de sedimentos, os quais obstruem o escoamento e aumentam o diferencial de pressão entre a parte superior e inferior dos obstáculos (Rauws e Govers, 1988; Abrahms e Li, 1998). O efeito do impacto das gotas de chuva sobre o escoamento de pouca espessura de lâmina de água também oferece resistência ao escoamento, pois provoca a redução de velocidade, uma vez que envolve a transferência de uma certa quantidade de movimento do escoamento para a gota a fim de acelerá-la até que a velocidade da gota atinja a velocidade do escoamento (Abrahms e Li, 1998). Com relação ao efeito de resistência ao escoamento provocado pela presença sedimentos transportados por saltação, Abrahms e Li (1998) verificaram que ele ocorre devido à aceleração sofrida pelos sedimentos, envolvendo uma transferência de quantidade de movimento do escoamento para os sedimentos, resultando num decréscimo de velocidade do escoamento.

O efeito da resistência ao escoamento tem uma grande influência sobre o perfil de velocidade do escoamento de forma que, em condições de maior resistência como no caso de superfície muito rugosa, ocorre um aumento do gradiente do perfil de velocidade, redução da velocidade média do escoamento e, conseqüentemente, um aumento na altura da lâmina de água e na velocidade de cisalhamento (Rauws e Govers, 1988).

A resistência total do escoamento pode ser descrita por fatores como o coeficiente de rugosidade de Chézy (C), o coeficiente de rugosidade de Manning (n) ou o fator de perda de carga de Darcy-Weisbach (f) sendo a equivalência entre eles representada pela expressão 3.2.

$$\frac{8}{\sqrt{f}} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{R^{1/6}}{n\sqrt{g}} \quad 3.2$$

Nos estudos relativos à mecânica da erosão em sulcos, no entanto, a resistência ao escoamento para condições de fundos irregulares tem sido geralmente descrita pelo fator perda de carga (f) (Savat, 1980; Rauws e Govers, 1988; Gilley et al., 1990; Govers, 1992; Nearing et al., 1997), o qual é definido pela seguinte equação:

$$f = \frac{8gRI}{v^2} \quad 3.3$$

onde g é a aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$), R é o raio hidráulico (m), I é a declividade do canal ($m\ m^{-1}$) e v é a velocidade do escoamento ($m\ s^{-1}$).

Seguindo o procedimento de divisão da resistência (abordagem linear), o fator de perda de carga pode ser desdobrado em fator de resistência ao grão e de resistência de forma (Rauws e Govers, 1988) conforme equação 3.4.

$$f_t = \frac{8gR_g I}{v^2} + \frac{8gR_f I}{v^2} \quad 3.4$$

onde R_g e R_f referem-se aos raios hidráulicos do grão e de forma, respectivamente. Considere-se que em situações de escoamento sobre fundos muito irregulares (que é o caso da condição dos escoamentos em áreas agrícolas), a maior parte da resistência ao escoamento ocorre em função da resistência de forma (Rauws e Govers, 1988). Nessa condição, a tensão cisalhante sobre o grãos e agregados de solo (tensão efetiva) representaria uma pequena parte da tensão cisalhante total, porém essa seria a parcela responsável pelo transporte de sedimentos e desagregação do solo (Rauws e Govers, 1988; Abrahams e Parsons, 1991).

A relação entre o fator de perda de carga e o número de Reynolds do escoamento depende, entre outros fatores, da rugosidade do fundo, da condição deste ser fixo ou móvel (erodível ou não) e da relação entre altura da lâmina de água e a espessura do elemento rugoso. Em relação a este último aspecto, Abrahams et al. (1986) verificaram que, na condição da altura da lâmina de água ser menor que o tamanho do elemento rugoso, o fator f aumenta com o Reynolds, uma vez que o aumento da lâmina de água implica em que o elemento rugoso seja progressivamente imerso ocorrendo um aumento do perímetro molhado e da área de resistência. Quando a altura do escoamento excede a altura do elemento rugoso, o fator f diminui com aumento do Reynolds.

Savat (1980) realizou um trabalho em condições de laboratório utilizando um canal onde procurou reproduzir diferentes superfícies rugosas colando areia e silte sobre o fundo para verificar os efeitos da resistência ao escoamento devido à rugosidade de grão. Seus resultados mostraram uma progressiva redução da resistência ao escoamento com incremento do número de Reynolds do escoamento.

Para condições de campo e trabalhando com solos agrícolas da zona leste americana em declives que variavam entre 4 a 10%, Gilley et al. (1990) determinaram a relação entre o número de Reynolds e os termos de resistência ao escoamento Darcy-Weisbach, Manning e Chèzy. Os autores verificaram que a melhor relação foi obtida entre o número de Reynolds e o fator f que variou de maneira exponencial onde o aumento do número de Reynolds foi acompanhado de uma redução da resistência ao escoamento. Esta condição sugere que com o

aumento da lâmina de água a rugosidade passou a ter menos influência sobre a resistência hidráulica.

O efeito da variabilidade espaço-temporal do fator perda de carga para um escoamento superficial, antes e após atingir as condições de equilíbrio, foi estudado por Parsons et al. (1990). Neste experimento os autores realizaram um trabalho de campo com simulador de chuva em uma região semi-árida do Arizona, USA. A rugosidade superficial era definida por sedimentos aluviais pouco consolidados, de textura grosseira enquanto que a macrorugosidade era composta por pedregulhos e cascalho. Os resultados mostraram que a relação entre o número de Reynolds e o fator perda de carga comportou-se de maneira diferente em regiões onde os autores consideraram como sendo de escoamento em condição de equilíbrio e de não equilíbrio. A região de não equilíbrio caracterizava-se pela condição do escoamento difuso antes do escoamento concentrar em sulcos (região de equilíbrio). Na região de escoamento difuso, a relação Reynolds e o fator perda de carga mostrava que o aumento daquele resultava em um incremento da resistência (e, conseqüentemente, num aumento da altura da lâmina de água e redução da velocidade média do escoamento), pois o escoamento superficial se expandia para uma área maior, exercendo uma maior resistência ao escoamento. Por outro lado, na região onde o escoamento se concentrava em sulcos (condição de equilíbrio), a resistência ao escoamento diminuía rapidamente com o aumento do Reynolds pelo efeito de concentração do escoamento nos caminhos preferencias formados pelos sulcos à jusante da região do escoamento difuso.

A relação entre o número de Reynolds e o fator perda de carga para as condições de erosão em sulco depende também do tipo de solo (Nearing et al. 1997). A partir da realização de vários experimentos em laboratório e no campo, trabalhando com dois tipos de solo (um arenoso e outro siltoso) e com areia de granulometria uniforme, verificaram que as relações entre o número de Reynolds e fator perda de carga se modificavam em função do substrato utilizado. No caso da areia com granulometria uniforme, verificou-se uma boa correlação entre o número de Reynolds e o fator perda de carga, de maneira que o incremento do número de Reynolds resultou em redução do fator perda de carga. Para a condição de solo arenoso e de solo siltoso não se observou nenhuma relação consistente entre estes dois fatores, ainda que, para o solo arenoso, a tendência dos dados tenha sido de um aumento do número de Reynolds resultando em redução do fator perda de carga. Já para o solo siltoso, a relação mostrou uma tendência contrária, ou seja, aumento do Reynolds resultou em aumento do fator perda de carga, já que o aumento da velocidade do escoamento causava a formação de

maiores fossas de erosão, sulcos e erosão regressiva, aumentando a rugosidade de forma. Para o solo arenoso que possuía uma menor coesão, não foi verificada a ocorrência de deformações do fundo capazes de se constituírem em obstáculos ao escoamento (conforme observado nos solos siltosos), sendo que os sulcos formados eram menos profundos que aqueles formados no solo siltoso e que, com areia de granulometria uniforme, a rugosidade de grão foi o fator preponderante na definição da rugosidade, determinando a resistência ao escoamento. Esses mesmos efeitos também se refletiram na falta de relação entre a variação da declividade e a velocidade do escoamento observada para o solo arenoso e siltoso, onde a melhor relação foi obtida relacionando a velocidade do escoamento com a descarga unitária. Situação similar foi observada por Govers (1992), a partir da realização de experimentos de campo e de laboratório, utilizando solos com diferentes texturas (arenosos, siltosos e argilosos), com o propósito de estabelecer relações entre a descarga líquida, a velocidade do escoamento e a declividade. Os resultados mostraram que a velocidade do escoamento concentrado no sulco não foi influenciada pela declividade, sugerindo que o aumento da declividade implica em maior erosão, que por sua vez provoca um aumento da rugosidade e, dessa forma, condiciona a redução na velocidade do escoamento.

A variabilidade espaço-temporal das seções transversais e longitudinais do sulco condiciona também a variação na velocidade do escoamento ao longo do sulco. Essa variabilidade foi estudada no trabalho realizado por Foster et al. (1984), modelando em fibra de vidro um trecho de um sulco gerado no campo sob condição de chuva simulada. A velocidade do escoamento foi medida em diferentes seções selecionadas através de leituras da altura do escoamento e da descarga líquida e também com uso de anemometria a filme quente em algumas seções. Os resultados experimentais mostraram que as irregularidades das seções condicionaram variações nas velocidades que seguiram uma distribuição normal (Gaussiana). Outro aspecto interessante desse experimento foi a constatação de diferenças entre os métodos de determinação da velocidade média das seções, sendo da ordem de quatro por cento quando comparando a medição com anemometria filme quente e a estimativa através da altura do escoamento. Os perfis de velocidade levantados com uso de anemometria foram comparados com aqueles estimados através da equação de distribuição de velocidade de Prandtl - von Karman (equação 3.4), verificando que os pontos de velocidade determinados por anemometria, pelo menos qualitativamente, concordaram bem com os pontos estimados pela equação 3.4.

$$u = \left(\frac{1}{\kappa} \right) u_* \ln \left(\frac{y}{y_0} \right) \quad 3.5$$

onde: u é a velocidade instantânea (m s^{-1}), κ é a constante de von Karman (adimensional), u_* é a velocidade de cisalhamento de fundo (m s^{-1}), y é a distância em relação ao fundo (m), y_0 é a distância em relação ao fundo onde a velocidade dada pelo perfil de velocidades é igual a zero.

Um outro aspecto importante a ser analisado refere-se às alterações provocadas pela presença de sedimentos em baixas concentrações (escoamento Newtoniano) nas características hidrodinâmicas do escoamento concentrado em sulcos. Para Mendoza e Zhou (1997), a presença de sedimentos em suspensão e em baixas concentrações afetam as seguintes características do escoamento: a) distribuição da velocidade média; b) constante de von Karman; c) resistência oferecida ao escoamento; d) intensidade turbulenta; e) taxa de dissipação da energia cinética turbulenta. Por outro lado, se considerarmos que a energia cinética turbulenta é reconhecida como fonte de energia para os processos de transporte e desagregação de sedimentos, é possível supor que a presença de sedimentos no escoamento possa afetar de alguma forma a dinâmica dos processos de desagregação e transporte de sedimentos.

Os efeitos da presença de sedimentos sobre a distribuição da velocidade média e sobre a resistência oferecida ao escoamento são relativamente bem conhecidos (Abrahams e Atkinson, 1993; Li e Abrahams, 1997); entretanto, os efeitos sobre a intensidade turbulenta e sobre a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta foram pouco estudados e, muitas vezes, as informações verificadas mostram resultados pouco conclusivos e contraditórios.

Um trabalho que ilustra de forma adequada os efeitos da adição de sedimentos transportados por saltação sobre a resistência ao escoamento foi conduzido por Abrahams e Li (1998). Nesse experimento, os autores trabalharam em condições de laboratório utilizando um canal de fundo fixo cuja rugosidade foi criada através da fixação de areia grossa ($d_{50}=0,00074\text{m}$) no fundo do canal. Os tratamentos testados pelos autores constou de uma combinação de cinco níveis de descarga líquida (0,0016, 0,00205, 0,00255, 0,00319 e $0,00364\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) com três níveis de descarga sólida (0,0687, 0,2645 e $0,4062\text{kg s}^{-3}$) sendo a descarga sólida composta pelo mesmo material do elemento rugoso que foi colado no fundo. A variável hidráulica avaliada nesse ensaio foi a variação da velocidade do escoamento medida com uso de um anemômetro a filme quente. Com base na velocidade média foi então calculada a resistência ao escoamento utilizando-se o fator perda de carga (equação 3.3). Resultados experimentais mostraram que, em presença de sedimentos, a velocidade média do

escoamento na região próxima às paredes do fundo foi menor, enquanto que o gradiente de velocidade foi maior quando comparado com a velocidade do escoamento, livre de sedimentos. Em relação aos efeitos de resistência ao escoamento verificou-se, por exemplo, que nas condições onde os sedimentos eram adicionados em cargas equivalentes a 87% da capacidade de transporte, a resistência ao escoamento devido à adição de sedimentos correspondeu a mais de 20% da resistência total ao escoamento.

Os efeitos da presença de sedimentos transportados por arraste sobre a intensidade turbulenta foram estudados por Wang e Larsen (1994). Eles realizaram um trabalho bastante consistente onde procuraram avaliar os efeitos da adição de sedimentos (areia muito grossa - $d_{50}=0,0015\text{m}$) sobre a estrutura turbulenta em três diferentes condições: água clara e duas misturas de água com argila dispersa nas concentrações de 7,66% e 9,43%. O efeito da presença de sedimentos no escoamento foi avaliada medindo-se a flutuação de velocidade com uso de um transdutor de pressão. Os resultados mostraram que, na condição onde foi adicionado sedimento grosseiro, a velocidade média do escoamento foi menor e o gradiente de velocidade maior que na condição onde não se adicionaram sedimentos. Por outro lado, verificou-se que a intensidade turbulenta do escoamento foi mais intensa quanto maior a descarga sólida transportada e que a posição onde a intensidade turbulenta era máxima distanciou-se do fundo. Na condição onde o escoamento foi misturado com argila e sem a presença de sedimentos grosseiros, verificou-se que a turbulência desenvolvia-se somente próximo ao fundo, enquanto que na parte superior o escoamento permanecia laminar. No entanto, para esse mesmo escoamento, foi verificado que, em presença de sedimentos, todo o escoamento tornava-se turbulento.

Em relação aos efeitos de dissipação da energia cinética turbulenta causada pelo aumento de viscosidade em decorrência da presença de sedimentos, Mendonza e Zhou (1997) comentam que a dificuldade em encontrar trabalhos que enfoquem esse tema deve-se ao fato de que a dissipação de energia não pode ser medida diretamente e que é necessário uma instrumentação refinada para possibilitar a geração de dados de qualidade. Esses mesmos autores, citam um trabalho realizado por Imamoto et al. (1977) onde foi verificado que a energia de dissipação aumentou com o incremento da concentração de sedimentos. Partindo dessas condições, Mendonza e Zhou (1997) comentam que é admitido conceitualmente que nas análises da energia cinética turbulenta, a energia de dissipação é maior quando o escoamento transporta sedimentos em suspensão pois dessa maneira o escoamento consumiria maior energia para manter os sedimentos em suspensão.

3.5. Desagregação do solo

No processo de erosão em sulco, considera-se que a desagregação do solo é provocada por diferentes mecanismos (Elliot, 1988): a) destacamento dos agregados da matriz do solo por ação do escoamento; b) erosão regressiva; c) solapamento; d) dispersão. O mecanismo de erosão por dispersão tem um papel importante nas condições de solos com alto conteúdo de argila dispersa em água, baixo conteúdo de matéria orgânica e condições de umidade antecedente muito baixa (Quirck e Panabokke, 1962). Por outro lado, o processo de desagregação do solo por solapamento poderá ser o mecanismo de desagregação preponderante quando a erosão em sulco ocorre sobre um solo pouco coesivo e com alta taxa de infiltração (solos arenosos por exemplo). O mecanismo de desagregação por solapamento não está diretamente associado à ação do escoamento, mas sim aos processos relacionados ao balanço entre as forças ativas, como peso do solo e pressão de sucção dos poros ao longo da superfície de ruptura e as forças de resistência do solo, como coesão e tensão de resistência do solo ao longo do plano de falha (Lambe e Whitman, 1969). Dessa forma, o uso de parâmetros hidráulicos para prever tanto a erosão por dispersão como por solapamento não são adequados e, devido à complexidade dos mecanismos envolvidos nessas formas de desagregação, os modelos de previsão de erosão como WEPP (Nearing et al., 1989), GUESS (Morgan, 1995) e EUROSEM (the European Soil Erosion Model) (Morgan et al., 1998) não contemplam em suas rotinas de cálculo esses processos de erosão.

Quanto ao processo de erosão regressiva, Elliot (1988) considera que essa pode ser modelada a partir de parâmetros hidráulicos como descarga líquida, declividade e largura do sulco e um parâmetro que descreva a resistência do solo à erosão regressiva. À exceção do modelo proposto por Meyer et al. (1975), em todos os demais modelos atualmente em uso consideram-se apenas o processo de desagregação por ação cisalhante do escoamento e por erosão regressiva.

A estimativa do processo de desagregação no modelo WEPP (Nearing et al., 1989) é obtida através de relações lineares com a tensão cisalhante do escoamento (τ), enquanto que nos modelos GUESS (Morgan, 1995) e EUROSEM (Morgan et al., 1998) são utilizados respectivamente os parâmetros potência do escoamento (Ω) e potência unitária do escoamento, respectivamente (ω). As expressões utilizadas no cálculo das taxas de desagregação de solo pelos modelos WEPP (Nearing et al., 1989), GUESS (Morgan, 1995) e

EUROSEM (Morgan et al., 1998) encontram-se descritas nas equações 3.6, 3.8 e 3.10, respectivamente.

No modelo WEPP temos:

$$D_c = K_r(\tau - \tau_c) \quad 3.6$$

onde K_r é a erodibilidade no sulco ($s \text{ m}^{-1}$), τ é a tensão cisalhante do escoamento ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$), τ_c é a tensão cisalhante crítica ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$). Por sua vez, a equação 3.7 define a tensão cisalhante:

$$\tau = \gamma h I \quad 3.7$$

onde γ é o peso específico da água (N m^{-3}), h é a altura média do escoamento (m).

No modelo GUESS temos:

$$D_r = (1 - H) \frac{F}{iJ} (\Omega - \Omega_c) \quad 3.8$$

onde $(1-H)$ é a fração da superfície do solo exposta à ação do escoamento (adimensional), F é a fração do excesso da potência do escoamento que é usada para desagregação (adimensional), i é o número de classes de sedimentos com velocidade de sedimentação semelhante (adimensional), J a quantidade de potência unitária do escoamento necessária para desagregar uma unidade de massa de solo (m s^{-1}), Ω é a potência do escoamento (kg s^{-3}) e Ω_c é a potência crítica do escoamento para início do processo de desagregação onde a potência do escoamento é definida pela equação 3.9.

$$\Omega = \gamma q I \quad 3.9$$

onde q é a vazão unitária ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$).

No modelo EUROSEM temos:

$$D_r = \beta \cdot w \cdot v_s (T_c - C_v) \quad 3.10$$

onde β é o parâmetro que expressa a eficiência do processo de desagregação sendo dependente da coesão do solo (adimensional), w é a largura do escoamento (m), v_s é a velocidade de sedimentação (m s^{-1}), T_c é a concentração máxima de sedimento a ser transportada definida pela equação 3.11 e C_v concentração volumétrica de sedimentos.

$$T_c = a(\omega - \omega_{\text{crítico}})^m \quad 3.11$$

onde a e m são fatores empíricos relacionados com o tamanho dos agregados e ω é potência unitária do escoamento (m s^{-1}) definida pela equação 3.12.

$$\omega = v \cdot I \quad 3.12$$

Nos modelos físicos de predição de erosão, supõe-se que as taxas de desagregação do solo apresentam uma relação linear ou quase linear com parâmetros hidráulicos como a tensão cisalhante e a potência unitária do escoamento. Nearing et al. (1991), no entanto, realizando experimentos em laboratório (com uso de um canal) sob condições controladas, verificaram que a relação entre a taxa de desagregação e a tensão cisalhante ou a potência do escoamento era exponencial ao invés de linear.

Considerando que a tensão de resistência do solo é da ordem de quilo Pascal, questiona-se, então, como poderia haver desagregação do solo se a diferença entre a tensão do escoamento e a resistência do solo é da ordem de mil vezes (Nearing et al., 1991). Para explicar esse paradoxo, Nearing et al., (1991), baseado na teoria da turbulência do escoamento, atribui aos efeitos “bursts” (evento turbulento de alta intensidade) que ocorrem de forma periódica e que estão associados às altas tensões de cisalhamento (muitas vezes superiores à tensão média do escoamento). Segundo Nearing et al., (1991), o processo de desagregação seria melhor descrito por mecanismos de natureza estocástica do que por parâmetros hidráulicos como a tensão cisalhante ou a potência média do escoamento. Os mecanismos de natureza mais estocástica levam em consideração a variação instantânea e localizada de eventos de alta energia (“bursts”) capazes de gerar tensões cisalhantes várias vezes maiores (aproximadamente 150 vezes) que as tensões médias do escoamento, os quais são acompanhados por intensa flutuação de velocidade. Segundo esse modelo, o mecanismo de desagregação do solo ocorre quando as partículas por ação da turbulência do escoamento são retiradas da superfície do solo uma vez que há a supremacia da tensão do escoamento sobre a reação do solo estimada através das forças de coesão. Essa condição foi examinada em um outro trabalho realizado por Nearing e Parker (1994) que procurou quantificar as taxas de desagregação do solo em condições de escoamento laminar e turbulento, constatando que as taxas de desagregação na condição de escoamento turbulento foram muito superiores quando comparadas as taxas de desagregação do escoamento laminar.

3.6. Capacidade de transporte de sedimentos

A capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento é considerada, como um dos parâmetros mais importantes para a predição de erosão, pois é através de sua determinação que será possível estimar quanto do sedimento desagregado em uma vertente poderá eventualmente chegar à rede de drenagem e, também, por que razão muitos modelos

de predição de erosão consideram que as taxas de desagregação de solo estão diretamente relacionados com a diferença entre a capacidade de transporte de sedimentos e a carga de sedimentos transportada (Govers, 1992 e Govers, 1996).

Os modelos de predição de erosão com base física geralmente utilizam expressões que foram desenvolvidas para estimar a capacidade de transporte de sedimento para condições de rios e canais. A expressão mais utilizada pelos modelos de predição de erosão é a expressão de Yalin (1963), que foi desenvolvida para estimar a capacidade de transporte de sedimentos por arraste e se baseia na análise das tensões de cisalhamento do escoamento. A expressão de Yalin (1963) foi proposta por Foster e Meyer (1972b) para ser utilizada em modelos de predição de erosão porque, segundo esses autores, essa expressão seria adequada para ser aplicada em condições de escoamento de pouca altura de lâmina de água, além de apresentar uma base teórica compatível com a natureza do mecanismo de transporte dos sedimentos em sulco (rolamento e saltação) e de necessitar poucos parâmetros para ser utilizada. Uma limitação do uso desta equação para estimar a capacidade de transporte de sedimentos nas condições de escoamento concentrado em sulco reside no fato de que a mesma não foi desenvolvida para representar o transporte de sedimentos finos (transportados por suspensão) que dependendo da composição granulométrica do solo pode ser um componente importante da descarga sólida.

Em outro trabalho, Alonso et al. (1981) desenvolveram um estudo visando validar diferentes expressões de transporte de sedimentos com base em resultados experimentais realizados em canais aluviais, parcelas de campo e canais de laboratório. Nesse trabalho foram avaliadas expressões para estimar o transporte de sedimentos por arraste e transporte total como Ackers & White, Engelund-Hansen, Yang, Laursen, Einstein-Meyer, Meyer-Peter & Muller, Bagnold e Yalin, sendo selecionadas em função dos seguintes critérios: (a) facilidade de uso computacional; (b) facilidade de obtenção dos parâmetros necessários; (c) segurança na estimativa da carga de sedimentos quando aplicada para diferentes condições de escoamento.

Os resultados mostraram que apenas três das equações apresentaram um comportamento satisfatório para as diferentes situações avaliadas. A equação de Yang foi mais adequada para a condição de escoamento de pequena altura de lâmina de água, conduzindo a resultados satisfatórios para uma maior gama de tamanhos e de densidade de sedimentos. Os autores, no entanto, comentam que nenhuma das equações foi capaz de

estimar o transporte de sedimentos de forma plenamente satisfatória, considerando-se as diferentes situações que representam os dados experimentais. Um passo adiante foi dado em trabalho realizado por Neibling & Foster (1981) que estudaram a capacidade de transporte de sedimentos a partir de dados experimentais gerados em experimento projetado para simular condições de escoamento de pequena altura de lâmina de água sob influência da precipitação. Foram testadas as expressões de Bagnold, Engelund & Hansen, Laursen, Meyer-Peter & Muller, Yalin e Yang, sendo verificado que a expressão de Yalin foi a que melhor se ajustou aos valores observados.

Em laboratório, utilizando um canal, Guy et al. (1992) avaliaram a capacidade de transporte de sedimentos para condições de diferentes declives, vazões e granulometria de sedimentos em presença e ausência de precipitação sobre o escoamento. Os resultados referentes à capacidade de transporte determinados experimentalmente foram comparados com estimativas feitas por seis equações de transporte de sedimentos: Yang, Du Boys, Bagnold, Laursen, Yalin e Schoklitsch. Os autores concluíram que nenhum modelo apresentou resultado satisfatório. Para condição de escoamento uniforme sem presença de precipitação, o modelo de Schoklitsch apresentou resultado satisfatório. Por outro lado, contrariando os demais trabalhos, a equação de Yalin não mostrou ser apropriada para as condições avaliadas e, com isso, concluíram que o uso da expressão de Yalin para estimar a capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento em modelos como o ANSWERS, CREAMS e, mais recentemente, o modelo WEPP (Nearing et al., 1989) poderia se constituir em fonte de erro na predição de erosão.

As equações desenvolvidas para condições de rios e canais, quando empregadas para estimar a capacidade de transporte de sedimentos por escoamentos superficiais e concentrados em sulcos, são questionáveis, uma vez que, em geral, são expressões empíricas e, quando empregadas em situações muito diferentes das condições que foram geradas, resultam em estimativas errôneas.

Trabalhos mais recentes sobre a determinação da capacidade de transporte de sedimentos em condições de escoamento superficial e concentrado em sulcos têm procurado relacionar a capacidade de transporte com parâmetros hidráulicos do escoamento de determinação simples. Entre os parâmetros hidráulicos utilizados com melhores resultados na predição da capacidade de transporte é citada a potência unitária do escoamento (Moore e Burch, 1986 e Govers e Rauws, 1986). A potência unitária do escoamento (ω) é definida

como sendo a energia dissipada pelo escoamento por unidade de tempo e por unidade de peso do fluido. Moore e Burch (1986) obtiveram resultados muito satisfatórios quando utilizaram a potência unitária do escoamento para estimar a capacidade de transporte de sedimentos em um experimento realizado a campo com diferentes solos (solos argilosos e com textura média) e diferentes condições de declive. Resultados semelhantes foram obtidos por Govers e Rauws (1986) que trabalharam com escoamento superficial em regime laminar e de transição sobre superfícies irregulares e regulares, em condições de meio coesivo e não coesivo (areia $d_{50} = 105\mu\text{m}$). Os resultados mostraram que a concentração de sedimentos relaciona-se com a potência unitária do escoamento e com a velocidade de cisalhamento de grão (u_*). Para a condição de meio não coesivo e com presença de resíduos vegetais na superfície, a potência unitária do escoamento foi capaz de prever razoavelmente bem a concentração de sedimentos. Govers e Rauws (1986) ressaltaram que a potência unitária do escoamento, além de ser um parâmetro hidráulico adequado para estimar a capacidade de transporte de sedimentos para escoamentos superficiais, é também um parâmetro hidráulico que pode ser obtido a campo a partir da determinação da velocidade do escoamento e admitindo-se que a declividade da linha de água é a mesma que a declividade do sulco.

Garcia (1983) trabalhando em um canal de fundo fixo e Borges (1987) em condições de um canal de fundo móvel, verificaram a validade do uso do critério da potência unitária como parâmetro hidráulico para previsão da capacidade de transporte máxima de sedimentos com material de fundo não coesivo. Segundo Borges (1987), a independência dessa grandeza em relação à profundidade e à velocidade do escoamento, confere a potência unitária do escoamento uma condição de unicidade em um leito móvel onde ocorrem sensíveis mudanças nas condições hidráulicas devido às oscilações da lâmina de água.

Também Nearing et al. (1997), em trabalho onde foram utilizados dados experimentais obtidos em laboratório e campo para dois tipos de solo (arenoso pouco coesivo e siltoso mais coesivo), procuraram relacionar parâmetros hidráulicos como tensão de cisalhamento (τ), potência unitária do escoamento (ω) e potência do escoamento (Ω) com o transporte de sedimentos, concluindo que a potência do escoamento foi o parâmetro hidráulico mais consistente e apropriado para estimar a capacidade de transporte dos sedimentos. A potência do escoamento é definida por Bagnold (1977) como sendo a quantidade de energia do escoamento por unidade de tempo e de área.

Um aspecto importante a ser considerado na determinação da capacidade de transporte de sedimentos em escoamento superficial e concentrado em sulco diz respeito à alteração da morfologia do sulco (variação na largura e declividade), condicionando uma variação espaço-temporal das características hidráulicas do escoamento e, conseqüentemente, da capacidade de transporte do escoamento, diferentemente da condição que encontramos nos canais aluviais, onde a morfologia do canal é mais estável. A condição de instabilidade da morfologia do sulco e dos processos de desagregação, transporte e deposição no sulco foram bem explorados no trabalho de Lei et al. (1998). Segundo esses autores, durante a evolução do sulco ocorre uma variação espaço-temporal de suas características morfológicas (seção transversal, longitudinal e do perfil em planta) em função da deformação do contorno sólido, cuja escala temporal é da ordem de segundos. Essas deformações, entretanto, modificam de forma contínua e interativa as características hidráulicas do escoamento e, conseqüentemente, o padrão de erosão. Dessa forma, a velocidade, a largura do escoamento, a altura da lâmina de água, o coeficiente de rugosidade, a declividade da linha de água, a taxa de desagregação do solo e de deposição de sedimentos são variáveis no tempo e no espaço, em função da evolução da morfologia do sulco. Com base nisso, Lei et al. (1998) desenvolveram um modelo matemático para simular a evolução de um sulco, baseado em equações que permitem calcular a distribuição espaço-temporal da capacidade de transporte de sedimentos, das taxas de desagregação de solo e de deposição de sedimentos, partindo das mudanças da morfologia local. Os resultados dessas simulações foram comparadas com resultados experimentais de trabalhos realizados em canais de laboratório que mostraram que o modelo seguiu os padrões das mudanças da morfologia do sulco observado.

O trabalho de Lei et al. (1998) chama atenção para a limitação dos principais modelos físicos atualmente em uso como o WEPP (Nearing et al., 1989), GUESS (Morgan, 1995) e EUROSEM (Morgan et al., 1998) que consideram como constante a morfologia do sulco sendo, portanto, modelos com limitada capacidade para prever a variabilidade espacial dos processos de erosão e deposição.

3.7. Efeito da descarga sólida do escoamento sobre os processos de desagregação e deposição

Um aspecto muito importante a ser considerado na dinâmica do processo da erosão em sulcos é a relação entre as taxas de desagregação de solo e a descarga sólida do escoamento.

Inicialmente acreditava-se que os sedimentos presentes no escoamento atuavam como agentes abrasivos, aumentando a capacidade de desagregação do escoamento (Ellison, 1947; Ellison e Ellison, 1947a e b). Nessa condição, admitia-se que um escoamento sem sedimentos apresentava uma máxima capacidade de transporte e uma mínima capacidade de desagregação, enquanto que, na situação onde o escoamento transportava muito sedimento, o escoamento apresentava uma mínima capacidade de transporte e uma máxima capacidade de desagregação. A máxima erosão ocorria quando o escoamento continha uma quantidade de sedimentos suficiente para provocar o efeito abrasivo necessário para desagregar solo em quantidade que o escoamento pudesse transportar.

Mais tarde, Foster e Meyer (1972a) propuseram uma teoria completamente oposta às idéias de Ellison (1947) e Ellison e Ellison (1947a e b), ou seja, a máxima desagregação deveria ocorrer na condição em que o escoamento não transporta sedimentos, enquanto que a menor desagregação, quando o escoamento transporta sedimentos próximo à sua capacidade de transporte. Essa suposição teórica não foi baseada em dados experimentais, mas sim em “razões intuitivas” como declaram os próprios autores. As “razões intuitivas” consideradas pelos autores referem-se aos problemas de erosão do leito e margens, observados no trecho dos rios localizados à jusante de reservatórios e também às observações experimentais feitas por Meyer e Monke (1965), as quais serão discutidas no parágrafo seguinte. A partir dessas considerações e de um trabalho realizado por Einstein (1968), onde esse autor procurou desenvolver leis que possibilitassem prever o depósito de silte sobre o leito de rios de reprodução de salmão, Foster e Meyer (1972a) propuseram a equação 3.1 que, atualmente, serve de referência para calcular as taxas de desagregação do solo em alguns modelos de predição de erosão. Por outro lado, é interessante verificar que Einstein (1968) mostrou que a taxa de deposição era diretamente proporcional à diferença entre a concentração de sedimentos real e a concentração de sedimentos em equilíbrio. Foster e Meyer (1972a), fazendo uma analogia com o trabalho de Einstein (1968), propuseram que a taxa de desagregação seria função direta da diferença entre a carga de sedimento em transporte e a capacidade de transporte de sedimentos do escoamento. No entanto, é necessário considerar que não existe registro na literatura sobre trabalhos experimentais que tivessem o objetivo de validar a proposição de Foster e Meyer (1972a), a qual foi aceita pela comunidade científica e incorporada em alguns modelos de predição de erosão como o WEPP (Nearing et al., 1989).

Alguns trabalhos relacionados à mecânica da erosão em sulco, no entanto, têm mostrado que as taxas de desagregação do solo são dependentes da descarga de sedimento

transportada pelo escoamento, de forma que o aumento da descarga de sedimento reduz a taxa de desagregação do solo (Meyer e Monke, 1965; Elliot, 1988; Rice e Wilson, 1990; Cochrane e Flanagan, 1996 e Nearing et al. 1997). Entretanto, os mecanismos envolvidos nesse processo são pouco conhecidos.

Um dos primeiros trabalhos que procura estudar o efeito da descarga sólida sobre a taxa de desagregação foi desenvolvido por Meyer e Monke (1965). Baseado em experimentos de canais em laboratório, os autores procuraram estabelecer relações entre a erosão e os fatores a ela relacionados como declividade, comprimento de rampa, vazão, precipitação e presença de sedimentos no escoamento. Como substrato a ser erodido e partículas a serem injetadas, foram utilizadas esferas de vidro com diferentes granulometrias (460 μm , 230 μm , 115 μm e 58 μm), verificando-se, então, que a taxa de desagregação no início do canal dependia da quantidade de sedimento adicionada, mas que a descarga sólida avaliada no final do canal era independente da quantidade de sedimento adicionado. Verificou-se também que a erosão diminuía no sentido de montante para jusante do canal, indicando que a taxa de desagregação era reduzida à medida que aumentava a descarga sólida do escoamento. Observações semelhantes foram feitas por Elliot (1988) em experimentos de campo sob condições de chuva simulada e de adição de escoamento superficial. Nesse experimento foram avaliados nove solos de diferentes locais dos Estados Unidos visando a determinação de parâmetros que, posteriormente, seriam utilizados para a predição de erosão em sulcos pré-formados com dimensões de 9m de comprimento e 0,5m de largura. Nas observações realizadas, Elliot (1988) verificou que a erosão no sulco ocorria com maior intensidade sob a forma de fossas, em local imediatamente abaixo do ponto onde era adicionado o escoamento superficial. Verificou-se, também, que a erosão diminuía nos trechos à jusante do início do sulco, onde era possível observar pontos de deposição em posições próximas ao final do sulco.

Rice e Wilson (1990) realizando um estudo das variáveis dinâmicas do escoamento em sulco, também verificaram efeitos da descarga sólida sobre a redução das taxas de desagregação. Em condições de laboratório, os autores utilizando um canal (9,8m de comprimento por 2,4m de largura), moldaram um sulco sobre um solo siltoso para avaliar algumas variáveis dinâmicas do escoamento (velocidade e perímetro molhado) empregando duas declividades (4 e 8%), três descargas líquida (0,00021; 0,00051 e 0,001 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) em ausência e presença de sedimentos. Os resultados mostraram que as taxas de desagregação foram dependentes da declividade e da concentração de sedimentos no escoamento. Em

presença de sedimentos, as taxas de desagregação foram menores para as três vazões, porém, para o declive de 4% as reduções das taxas de desagregação pela presença de sedimentos foram menores, sendo este efeito atribuído à baixa concentração de sedimentos presente no escoamento.

Outro trabalho, em nível de laboratório, relacionando os efeitos de adições crescentes de sedimento ao escoamento com as taxas de desagregação e deposição de sedimentos foi realizado por Cochrane e Flanagan (1996). Para realização desse estudo, foi desenvolvido um equipamento denominado simulador de sulco, o qual consiste em um canal com 3,66m de comprimento, com declive variável, permitindo moldar sulcos com diferentes formas de seções transversais. Com ele, os autores realizaram um experimento onde foi avaliada a distribuição espacial das taxas de desagregação e de deposição dos sedimentos sobre um substrato arenoso (areia $d_{50}=326\mu\text{m}$) para uma declividade de 5% e combinação de duas descargas líquidas ($0,00038$ e $0,00050\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) com três descargas de sedimentos ($0,00$; $0,0053$ e $0,0108\text{kg s}^{-1}$), sendo o material adicionado composto pelo mesmo material do substrato. Para o levantamento da distribuição espacial das taxas de desagregação e deposição, foi utilizado um sistema ótico (laser), para determinar as depressões (áreas de desagregação) e as ondulações (área de deposição), antes e após a passagem do escoamento sobre o sulco. A partir destas informações e com o uso do sistema geográfico de informações foi possível determinar a distribuição espacial das taxas de desagregação e deposição de sedimentos. Pelos resultados, verificou-se que as maiores taxas de desagregação ocorreram no segmento inicial do sulco e que o aumento das taxas de desagregação estavam diretamente relacionados com o aumento da descarga líquida e inversamente relacionados com a descarga sólida adicionada. Os autores utilizaram os resultados para comparar os valores obtidos com os valores estimados pela equação de desagregação do modelo WEPP (Nearing et al., 1989), partindo da calibração de alguns parâmetros de erodibilidade, verificando um ajuste satisfatório entre os valores observados e estimados pelo modelo para as adições de sedimento de 0 e $0,0053\text{kg s}^{-1}$. Para o maior valor de adição de sedimentos, o ajuste não foi satisfatório (valores foram subestimados) e duas hipóteses foram formuladas: (a) que a tensão de cisalhamento do escoamento seja, em realidade, maior do que a prevista pelo modelo; (b) que a capacidade de transporte de sedimentos esteja sendo subestimada em função do uso da expressão de Yalin (1963). Estas duas hipóteses parecem coerentes, uma vez que a expressão de Yalin (1963), conforme já comentado, é baseada na tensão cisalhante média do escoamento.

A distribuição espacial das taxas de desagregação em condições de escoamento em sulco e sua relação com a descarga sólida também foi avaliada por Nearing et al. (1997). Esses autores, trabalhando com experimentos de laboratório em um canal de declividade variável e sob a condição de substrato não coesivo (areia média $d_{50}=300\mu\text{m}$) e coesivo (solo arenoso e siltoso), verificaram um aumento da descarga sólida ao longo do canal até uma determinada seção. A partir desse ponto, a descarga sólida tornava-se constante o que significa que a quantidade de sedimentos transportada pelo escoamento atingiu a capacidade de transporte. Tanto os valores referentes à descarga sólida como o segmento percorrido pelo escoamento até atingir a capacidade de transporte mostraram ser dependentes da declividade. Com o aumento do declive, os valores da descarga sólida ficavam maiores e se encurtava a distância na qual o escoamento atingia a capacidade de transporte. Essas condições foram relacionadas com a erosão determinada nos ensaios onde observou-se a tendência de, no trecho inicial do canal, o volume de material erodido ser mais ou menos constante para o trecho correspondente ao trecho onde a descarga sólida ainda não apresentava um valor constante. Porém, o volume de material erodido foi sendo reduzido a partir do ponto onde a descarga sólida passou a se tornar constante, indicando que o aumento da descarga sólida do escoamento até o limite da capacidade de transporte reduz a capacidade do escoamento em desagregar novas partículas.

3.8. Energia do escoamento utilizada nos processos de desagregação e transporte

Os efeitos da descarga sólida do escoamento sobre as taxas de desagregação do solo estão relacionados, em parte, com a energia do escoamento que é transferida aos processos de resistência da superfície ao escoamento, de desagregação do solo, de transporte de sedimentos e de turbulência do escoamento. Na Figura 3.4 é mostrado um diagrama representando os processos de transferência e de dissipação de energia do escoamento. Os processos relacionados à desagregação, ao transporte, à resistência oferecida pelo contorno sólido ao escoamento e à turbulência ocorrem a partir da transferência da energia total do escoamento à esses processos. Uma parte dessa energia é dissipada pela turbulência através da transferência de energia dos grandes (macro-escala) para os pequenos (micro-escala) turbilhões. A transferência da energia do escoamento para os diferentes processos é dinâmica e ocorre de forma interativa. No caso dos processos de desagregação e transporte por exemplo, havendo disponibilidade de sedimentos para transportar, parte da energia será mobilizada para o transporte em detrimento da desagregação e vice-versa. A dissipação da energia, por outro

lado, ocorre sob forma de liberação de calor e ruído, sendo função direta da viscosidade do meio composto pela mistura água-sedimento e do choque entre as partículas (sedimentos) em movimento.

A energia utilizada nos processos de desagregação de solo e do transporte dos sedimentos é proveniente da energia cinética turbulenta. Os eventos de turbulência como os “bursts”, por exemplo, ocorrem de maneira aleatória no espaço com uma determinada frequência e são capazes de gerar focos de alta tensão cisalhante. Como os processos de desagregação e de transporte ocorrem de forma simultânea e considerando o fato de que a energia necessária para desagregar solo é maior do que a energia necessária para transportar sedimentos, é razoável supor que, havendo disponibilidade de sedimentos a serem transportados, a energia disponível para esses processos será mobilizada preferencialmente para o transporte em detrimento da desagregação.

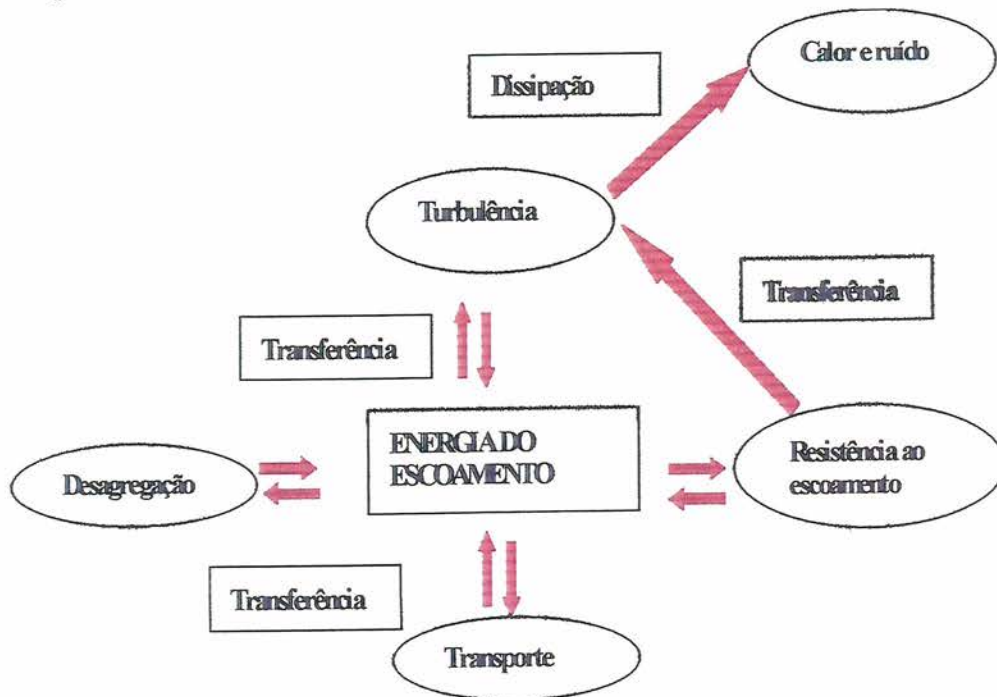


Figura 3.4: Diagrama de utilização da energia do escoamento pelos diferentes processos relacionados com a erosão em sulco.

As suposições teóricas do diagrama da Figura 3.4 são suportadas pelos modelos teóricos de Foster e Meyer (1972a), Foster (1982) e Hairsine e Rose (1992). Os primeiros autores sustentam a hipótese de que o escoamento possui uma energia finita, utilizada tanto para desagregar como transportar sedimentos já desagregados. Nessa hipótese, é considerado que, em geral, a energia requerida para a continuidade de movimento dos sedimentos em trânsito bem como para o início de movimento dos sedimentos já desagregados que se

encontram em repouso no fundo do canal é menor do que a energia necessária para desagregar sedimentos a partir da massa do solo. Dessa maneira, a energia seria utilizada preferencialmente para os processos relacionados à continuidade e ao início de movimento dos sedimentos e que a energia excedente poderia ser então utilizada para o processo de desagregação. No modelo conceitual de Foster e Meyer (1972a), a energia do escoamento é distribuída entre os processos de transporte e desagregação, sendo esta última função da diferença entre a energia total, representada pela capacidade máxima de transporte de sedimento pelo escoamento, menos a energia mobilizada para o transporte, representada pela descarga sólida em trânsito. Verifica-se, nesse caso, que a determinação da capacidade de transporte se torna essencial para a estimativa das taxas de desagregação ou deposição.

Um segundo modelo teórico, que também contempla as suposições apresentadas no diagrama da Figura 3.4, é o modelo de Hairsine e Rose (1992), visualizado na Figura 3.5. Nesse modelo, considera-se que a energia do escoamento, representada pela potência total do escoamento (Ω), é utilizada para: a) superar o limite crítico de resistência do meio coesivo para início do processo de desagregação; b) desagregar os sedimentos; c) iniciar o movimento dos sedimentos já desagregados que se encontram em repouso no fundo do leito; d) dissipar a energia em forma de calor e ruído. No modelo de Hairsine e Rose (1992) é também considerado que os sedimentos depositados de forma contínua sobre o leito causam uma proteção da superfície contra ação das forças erosivas, representadas pelas tensões de cisalhamento junto ao fundo.

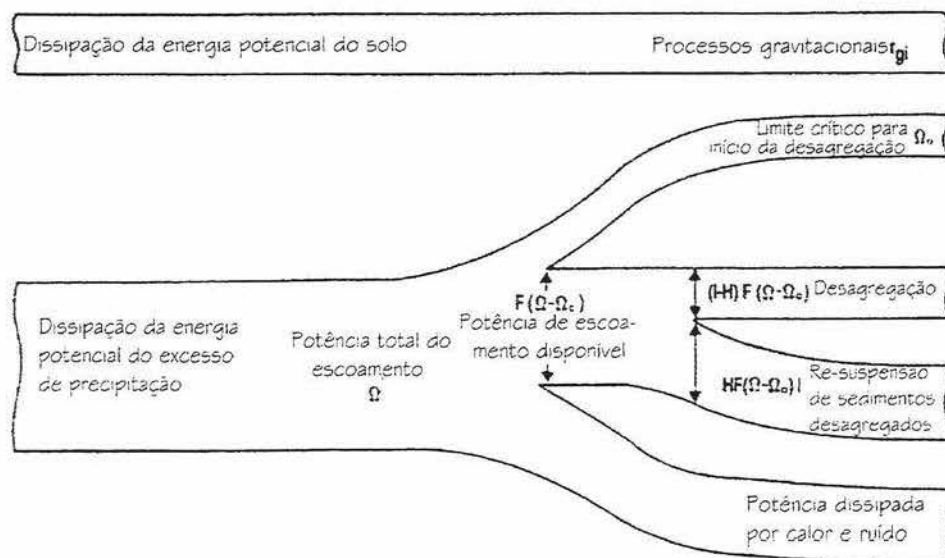


Figura 3.5 Representação esquemática adaptada da utilização da energia do escoamento para os processos de erosão do solo conforme o modelo teórico de Hairsine e Rose (1992).

É provável que a redução das taxas de desagregação do solo, ocasionada pelo efeito da presença de sedimentos no escoamento, deva-se ao efeito conjugado da mobilização da energia para o transporte em detrimento da desagregação e, também, pelo efeito de pavimentação causado pelos sedimentos depositados ou em trânsito sobre a superfície do solo. No entanto, até o presente momento essas suposições teóricas ainda não foram totalmente validadas, sendo necessários estudos para conhecer os mecanismos envolvidos nesse processo.

4. Material e Métodos

Dois experimentos foram delineados para avaliar o efeito da adição de sedimentos sobre as características hidráulicas do escoamento e sobre a desagregação do solo. No primeiro experimento, o efeito da adição de sedimentos sobre o processo de desagregação de solo foi avaliado em uma seção (avaliação pontual), enquanto que no segundo experimento estudou-se esse mesmo efeito ao longo de um trecho (avaliação espacial). O primeiro experimento foi realizado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, enquanto que o segundo no National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL) na Universidade de Purdue nos Estados Unidos.

Para o trabalho conduzido no IPH, procurou-se adaptar o procedimento experimental utilizado por Nearing et al. (1991) e, para tanto foi necessário construir um canal de declividade variável. Já para o trabalho realizado no NSERL foi desenvolvido um método que possibilitou estudar a distribuição espacial das taxas de desagregação do solo e deposição de sedimentos a partir de um canal semelhante ao que foi construído no IPH. Neste capítulo a descrição do procedimento experimental utilizado nos dois locais serão apresentadas separadamente.

4.1. Experimento 1: Características hidráulicas do escoamento e processo de desagregação do solo afetados pela adição de sedimentos

Este experimento foi conduzido no IPH e desenvolvido em duas etapas. Na primeira, procurou-se selecionar, para uma condição de 3% de declive uma vazão onde a capacidade de transporte de sedimentos fosse conhecida. Numa segunda etapa, adições crescentes de sedimentos variando entre 0 a 129% da capacidade de transporte foram adicionados para verificar os efeitos da descarga sólida sobre as características hidráulicas do escoamento e sobre o processo de desagregação do solo.

4.1.1. Equipamentos

Foi desenvolvido e construído um canal de vidro com estrutura metálica e declividade variável, nas dimensões de 9m de comprimento e 0,6m de largura (Figura 4.1). A circulação

de água no canal é feita em circuito fechado, sendo composta por um tanque de decantação, um reservatório para fornecer água ao canal em condições de carga constante, um vertedor, uma câmara de tranquilização (Figura 4.2) e uma moto-bomba. O ajuste das vazões é feito mediante uso de registros, enquanto que a adição de sedimentos é realizada através de um silo que abastece, por gravidade, um distribuidor de sedimentos (Figura 4.3).

Num trecho localizado a 5,26m do início do canal, sobre o fundo do canal, foi colada na extensão 2,8m de comprimento uma lixa de malha 36 (equivalente a uma granulometria de $500\mu\text{m}$), com objetivo de criar uma condição de rugosidade de fundo semelhante à rugosidade das amostras de solo utilizadas na determinação das taxas de desagregação de solo. Na Figura 4.4 é apresentado um croqui do canal onde se pode observar as posições do vertedor, da câmara de tranquilização, do local de adição de sedimentos, da zona de ensaios, do local de colocação do cilindro e das posições de leitura da lâmina de água com a ponta linimétrica.



Figura 4.1 Foto com vista geral do canal.

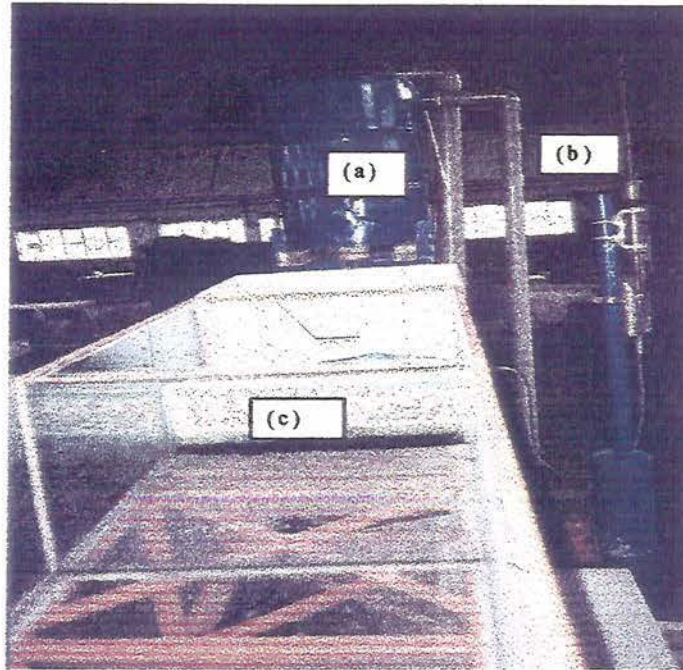


Figura 4.2 Foto com detalhe do reservatório localizado à montante do canal para manter um fornecimento de água em condição de carga constante (a), ponta linimétrica para ajuste da vazão no vertedor (b) e colméia para tranquilização do escoamento (c).



Figura 4.3 Foto do sistema de abastecimento sólido composto por silo e distribuidor de sedimentos.

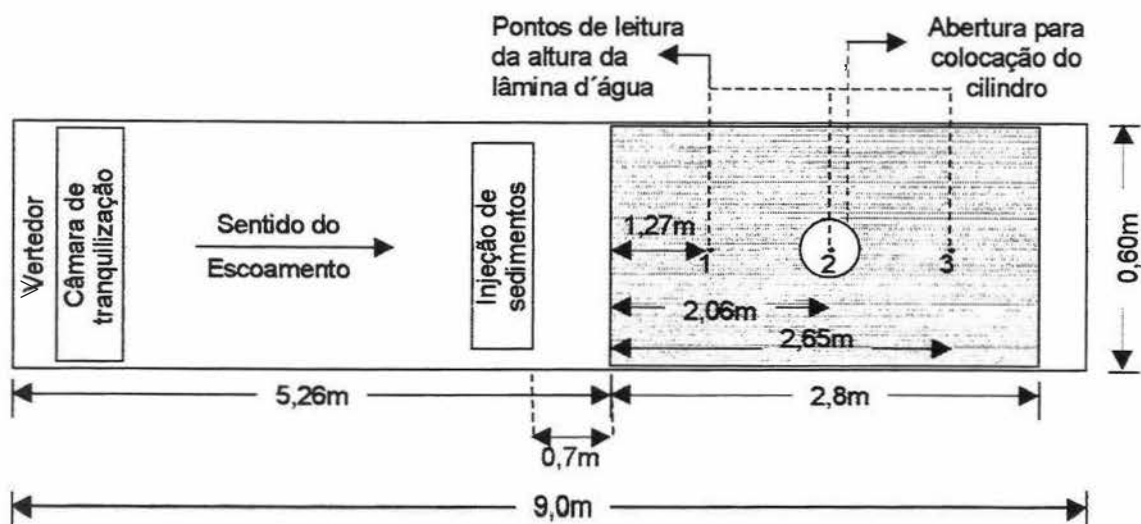


Figura 4.4 Esquema, em planta, da localização dos diferentes elementos que compõem o canal e dos locais das medições.

4.1.2. Determinação da capacidade de transporte de sedimentos

Para a determinação da capacidade de transporte de sedimentos em condições de fundo fixo, utilizou-se o procedimento onde inicialmente é definida uma descarga sólida constante a ser injetada na corrente, ensaiam-se várias vazões em ordem decrescente, até que se observe uma deposição de sedimentos contínua na zona de observação.

O sedimento utilizado para avaliar a capacidade de transporte foi carvão mineral “antracito” normalmente utilizado para tratamento de água. Esse carvão foi inicialmente peneirado e depois lavado para obter um material com granulometria uniforme com um intervalo de classe entre 2 e 1mm e livre de impurezas. Após esses procedimentos, o carvão apresentava uma granulometria com $d_{50}=1090\mu\text{m}$ e massa específica $1,89\text{Mg m}^{-3}$. A escolha do carvão mineral para ser utilizado como sedimento neste ensaio deve-se à sua semelhança com os agregados de solo, quanto sua massa específica e sua porosidade e, também, pela facilidade de manuseio e possibilidade de reutilização após secagem.

O procedimento utilizado para a determinação da capacidade de transporte foi o seguinte: inicialmente eram calculadas, como primeira aproximação, vazões teóricas capazes de transportar a descarga sólida adicionada através da equação 4.1 a qual foi gerada a partir de ensaios experimentais realizados no IPH para determinação da capacidade de transporte por arraste em condições de canal com fundo fixo (Silvestrini, 1991). Foi então fixada uma

descarga sólida compatível com o sistema silo e distribuidor de sedimentos e determinada a vazão necessária para transportá-la.

$$YZ_f^{-0,247}Z_i^{-0,87} = 1,255\left(\frac{x}{Z_i}\right)^{0,554} \quad 4.1$$

Considerando: $Y = \frac{\gamma q l}{\gamma_s v}$, onde γ_s é o peso específico do grão ($N\ m^{-3}$), v é a viscosidade cinemática da água ($m^2\ s^{-1}$), $Z_i = \left(\frac{d_f^{1/3}}{v^{2/3}}\right)$, $Z_f = \left(\frac{d_i g_v^{1/3}}{v^{2/3}}\right)$, d_f é a granulometria referente a rugosidade de grãos e d_i é a granulometria dos sedimentos (m), $x = \frac{g_v}{v}$, g_v é a descarga sólida por volume por unidade de largura ($m^2\ s^{-1}$)

A partir da estimativa da vazão teórica capaz de transportar a descarga sólida adicionada na condição de fundo fixo, foi realizado um teste preliminar com vazões maiores a ela e menores. Sedimentos foram adicionados no escoamento a uma taxa de $58,4g\ s^{-1}$ (que corresponde a descarga sólida fixada arbitrariamente e compatível com o sistema silo e distribuidor de sedimentos). Por observação visual, verificava-se qual a vazão em que ocorria um maior depósito sobre o trecho onde eram realizados as determinações. A vazão correspondente a maior deposição foi considerada como referência inicial para escolha das vazões que foram ensaiadas na etapa seguinte: 0,0025; 0,0020; 0,0016; 0,0015 e $0,001m^3\ s^{-1}$.

Uma vez estabelecida as vazões, realizou-se um novo ensaio visando uma identificação mais criteriosa da vazão que causava o maior depósito do material adicionado. Nessa etapa, da mesma forma que na anterior, era adicionado uma descarga sólida de $58,4g\ s^{-1}$ com às diferentes vazões ensaiadas por um tempo de aproximadamente 300s. Durante esse intervalo de tempo, todo sedimento que era transportado até o exutório do canal era recolhido em uma malha de aço. Ao final do ensaio também era recolhido do canal todo sedimento que ficava depositado no canal. Tanto os sedimentos transportados como os depositados, foram pesados úmidos 15min após serem recolhidos permitindo escoar o excesso de água. Para converter o peso da massa úmida em massa seca, amostras dos sedimentos transportados e depositados eram recolhidas para verificação da umidade gravimétrica. A determinação da concentração de sedimentos no escoamento foi realizada por amostragem do escoamento no exutório do canal em potes plásticos aos 90, 150 e 210s, a contar do início do ensaio. Os potes contendo amostras do escoamento com sedimentos eram pesados, retirada a água, colocados

em estufa a uma temperatura de 60°C até atingirem peso constante e, então, novamente pesados.

Variáveis hidráulicas como velocidade e altura do escoamento foram determinadas para cada vazão ensaiada com e sem presença de sedimentos. A altura da lâmina de água foi determinada com uso de uma ponta linimétrica em três posições que pode ser identificadas na Figura 4.4. A velocidade do escoamento foi avaliada mediante o uso de tinta traçadora onde era medido o tempo de deslocamento da tinta para percorrer uma distância de 2,8m correspondente a região de ensaios. Cada medida de velocidade foi repetida três vezes e o valor obtido foi multiplicado por um fator de correção (α) definido pela equação 4.2 conforme sugerido por Li e Atkinson (1996):

$$\alpha = -0,251 - 0,327 \log I + 0,114 \log Re \quad 4.2$$

onde: Re é o número de Reynolds.

Com base na massa de sedimentos depositada no canal e de um ajuste gráfico da relação entre a vazão e a porcentagem de depósito foi determinado um valor numérico da vazão correspondente à capacidade de transporte.

4.1.3. Determinação dos efeitos de adições crescentes de sedimentos sobre as características hidráulicas do escoamento e sobre as taxas de desagregação do solo

A determinação dos efeitos de adições crescentes de sedimentos sobre as características hidráulicas do escoamento e sobre as taxas de desagregação do solo foi realizada tomando-se como base a vazão correspondente à capacidade de transporte para condição de 3% de declive, determinada na etapa anterior. Fixando-se a vazão correspondente à capacidade de transporte, adicionou-se no escoamento quantidades crescentes de sedimentos cujas descargas sólidas de 0g s⁻¹; 10,4g s⁻¹; 16g s⁻¹; 26,1g s⁻¹; 35,3g s⁻¹; 47,2g s⁻¹; 61,1g s⁻¹ e 75,5g s⁻¹ equivalentes, respectivamente a 0%; 17%; 26,2%; 42,7%; 57,8%; 77,3%; 104% e 123,6% da capacidade de transporte. O valor de 61,1g s⁻¹, utilizado como descarga sólida injetada ao invés dos 58,4g s⁻¹ adicionado na primeira etapa do experimento, deve-se às limitações de regulagem do distribuidor de sedimentos.

Na determinação das taxas de desagregação foi utilizado o procedimento experimental desenvolvido por Nearing et al. (1991). Utilizaram-se agregados coletados no horizonte A do

solo tipo Latossolo Vermelho Aluminoférrico típico, (areia 80g kg^{-1} , silte 240g kg^{-1} e argila 680g kg^{-1}) (HAPLORTOX), conforme nomenclatura nova da EMBRAPA, 1999, em áreas de mato no município de Pejuçara-RS. Após a coleta destes agregados, os mesmos foram cuidadosamente acondicionados em caixas e transportados para o laboratório de sedimentos do IPH em Porto Alegre. Na seqüência, os agregados foram colocados para secar à sombra por um período aproximado de uma semana e então peneirados à mão em um conjunto de peneiras (3, 2 e 1mm de diâmetro de peneira). Para o experimento foram utilizados somente as frações inferiores a diâmetro de peneira de 1mm.

Após o peneiramento, os agregados foram acomodados dentro de um cilindro de PVC que possuía uma altura de 0,10m e 0,0968m de diâmetro (Figura 4.5). Dentro do cilindro era ajustada uma esponja de densidade 33 com 0,07m de espessura sobre a qual era acomodado um papel filtro e, sobre esse, uma camada de 0,03m de agregados secos à sombra. O uso da esponja teve como funções: reter os agregados dentro do cilindro, possibilitar a transmissão de água para os agregados durante a saturação e permitir a livre drenagem durante o ensaio. Uma vez acomodados dentro do cilindro os agregados formavam uma amostra com massa específica de aproximadamente $0,87\text{Mg m}^{-3}$.

Após a preparação dos cilindros, esses eram pesados e colocados dentro de uma bandeja (Figura 4.6) para saturar por ascensão capilar e depois por elevação do nível da água. Após a saturação das amostras (deixados por um período de um dia), o cilindro era ajustado na região de ensaios do canal (ver Figura 4.4) de forma que a superfície dos agregados fosse nivelada com o fundo do canal, possibilitando ao escoamento incidir sobre os agregados contidos no cilindro. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram detalhes do local onde eram colocados os cilindros. Momento antes da exposição do cilindro ao escoamento, eram feitas determinações da altura do escoamento, com uso da ponta linimétrica, e da velocidade do escoamento, utilizando-se o método da tinta traçadora, afim de caracterizá-lo sob o ponto de vista hidráulico.

Para a caracterização da morfologia da superfície do cilindro antes e depois da ação do escoamento, foram realizadas descrições da superfície das amostras com uso de distanciômetro a laser, cujo feixe de luz era orientado pelo uso de um quadro que representava as ordenadas e abcissas dos pontos de leitura da superfície (Figura 4.9). A modelação numérica das amostras foi realizado com uso do programa “Surfer 6,01”, através de uma interpolação do tipo krigeagem, para, posteriormente, gerar as figuras que representam a superfície das amostras antes e depois da passagem do escoamento.

Para a determinação das taxas de desagregação o cilindro era exposto ao escoamento durante 3s a 5s. O tempo de exposição foi estabelecido a partir de ensaios preliminares onde foi filmado o processo de desagregação que ocorria na amostra de solo dentro do cilindro. A partir desses ensaios, verificou-se que, no instante em que o escoamento incidia sobre a amostra de solo, ocorria a formação de uma ondulação que se propagava no sentido de montante para jusante e que era acompanhada de uma intensa turbulência que provocava uma grande erosão localizada. Dessa forma, adotou-se o critério de encerrar o ensaio no instante em que a ondulação se propagava para jusante.

A interrupção do ensaio era realizada com a colocação de um cilindro de PVC sobre o cilindro que continha a amostra de solo, impedindo a passagem do escoamento sobre a mesma. Após a interrupção da exposição, o cilindro era retirado e posto para secar na estufa até atingir peso constante, sendo então pesado para determinar a massa de solo desagregado. O procedimento para determinação das taxas de desagregação foi repetido pelo menos dez vezes. Algumas repetições, no entanto, foram descartadas devido a problemas operacionais que ocorreram durante a execução do ensaio.

A taxa de desagregação de solo das amostras foi calculada dividindo-se a massa desagregada pela área do cilindro e pelo tempo de duração de exposição da amostra ao escoamento.

Também foram registradas, com uso de uma câmera VHS, as imagens da ação do escoamento sobre a superfície da amostra, as quais, separadas quadro a quadro, permitiram a obtenção de uma seqüência de fotos que descrevem os efeitos da ação do escoamento sobre os agregados contidos dentro do cilindro.



Figura 4.5 Detalhes da preparação dos agregados de solo dentro dos cilindros.



Figura 4.6 Agregados de solo de classe inferior a 1mm sendo umedecidos.

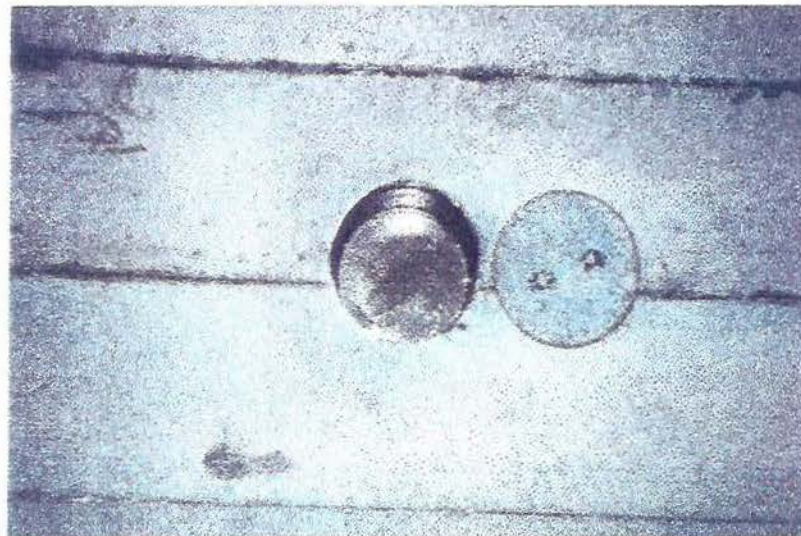


Figura 4.7 Fundo do canal mostrando o local de colocação do cilindro contendo agregados de solo.



Figura 4.8 Vista sob o canal do local de colocação do cilindro contendo agregados de solo.



Figura 4.9 Distanciômetro a laser e grade para orientação das leituras utilizados para o levantamento da morfologia da superfície dos agregados de solo contidos no cilindro.

4.2. Experimento 2: Distribuição espacial dos processos de desagregação do solo e deposição de sedimentos com a adição de sedimentos

Este segundo experimento foi conduzido no National Soil Erosion Research Laboratory na Universidade de Purdue no ano de 1998.

4.2.1. Equipamentos

Para realização deste experimento foi utilizado um canal de declividade variável, semelhante ao utilizado no experimento 1, sobre o qual foi montada uma seqüência de caixas de alumínio com as seguintes dimensões: 0,10m de largura por 0,10m de altura por 0,25m de comprimento (4 caixas); 0,10m de largura por 0,10m de altura por 0,50m de comprimento (6 caixas) e 0,10m de largura por 0,10m de altura por 1,0m de comprimento (4 caixas). Após serem conectadas, as caixas metálicas formam um pequeno canal retangular com 7,60m de comprimento e 0,10m de largura (Figuras 4.10 e 4.11). O abastecimento de água para o canal era realizado por um sistema formado por um reservatório (mantido cheio durante os ensaios), moto-bomba e registro que permitiam o ajuste das vazões. A adição de sedimentos no escoamento era realizada por um conjunto silo distribuidor de sedimentos do tipo esteira cuja descarga sólida era controlada através do ajuste da velocidade da esteira. A mistura de sedimentos com água era realizada em uma caixa com 0,10m de largura x 0,10m de altura e 0,40m de comprimento denominada de caixa de mistura (Figura 4.12). A caixa de mistura era ajustada sobre a superfície do solo contido na primeira caixa da seqüência das quatorze caixas que conectadas formavam o canal. Dentro da caixa de mistura era acoplada uma mangueira, que conduzia a água proveniente do reservatório, após a qual seguia-se um conjunto formado por uma malha plástica e colmeia construída com pequenos tubos plásticos que tinham a função de, respectivamente, tranquilizar e orientar o escoamento (Figura 4.12). No segmento final da caixa de entrada, era acoplado o distribuidor de sedimentos para adição da descarga sólida em sentido contrário ao escoamento. No trecho do canal onde ocorria a mistura de água e sedimentos, foram colados, no fundo da caixa, agregados do mesmo solo utilizado no experimento. Esse procedimento foi utilizado para criar uma condição de rugosidade semelhante entre a entrada do canal e as caixas que continham solo.

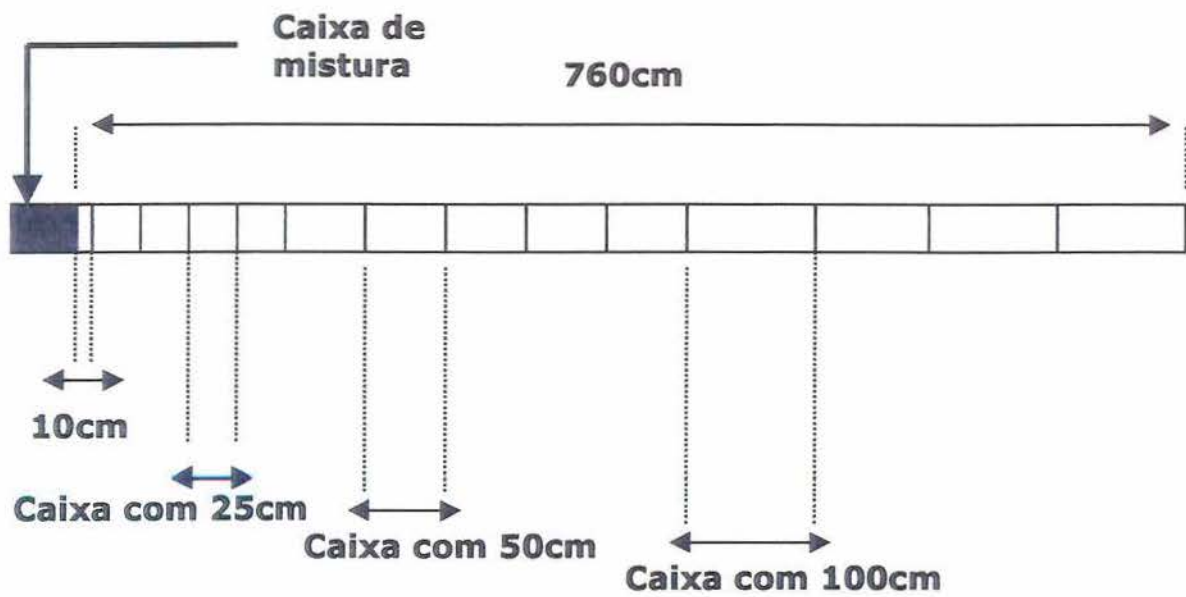


Figura 4.10 Esquema, em planta, da disposição das caixas formando o canal.



Figura 4.11 Sequência de caixas e conjunto silo distribuidor de sedimentos montadas sobre um canal de declividade variável.

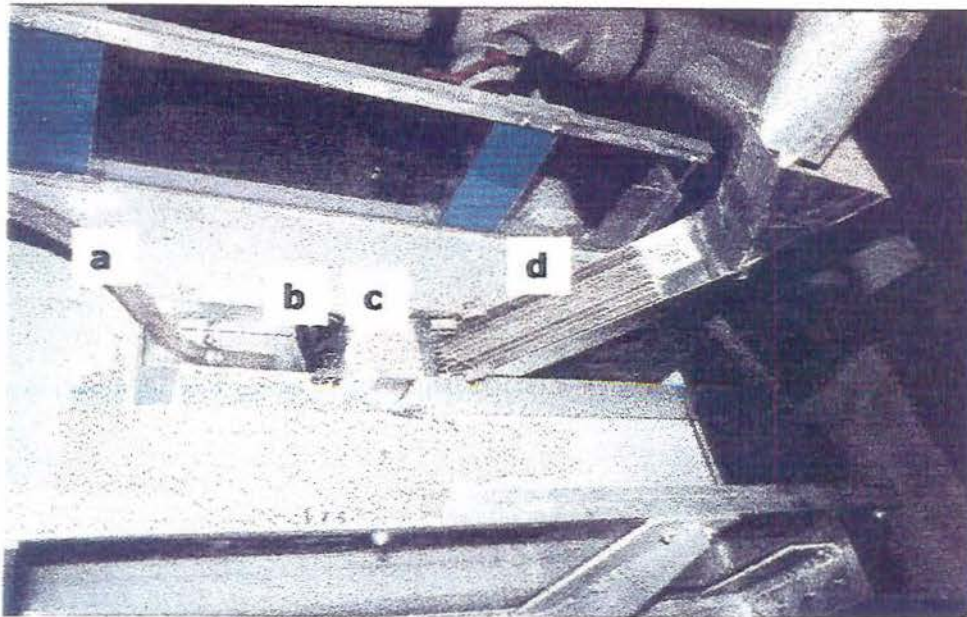


Figura 4.12 Detalhes da caixa de mistura do escoamento com os sedimentos mostrando a mangueira para entrada de água (a), a malha plástica (b), a colmeia (c), o local de mistura do escoamento com sedimento (d) e o distribuidor de sedimentos (e).

4.2.2. Preparação das caixas

O solo utilizado no experimento corresponde à série Cecil (Typic Hapludult) que foi coletado no Estado da Georgia (horizonte A) em área de pastagem. O solo foi transportado para o NSERL no Estado de Indiana e colocado para secar à sombra. A análise granulométrica do solo mostrou a seguinte composição: 714g kg^{-1} de areia, 174g kg^{-1} de silte e 113g kg^{-1} de argila.

Para preparação das caixas, o solo foi peneirado manualmente em uma peneira com $2500\mu\text{m}$ de diâmetro de abertura. Determinação do tamanho de partículas do solo determinado pelo método do tamisamento úmido após ter sido peneirado apresentou a seguinte distribuição: $d_5=140\mu\text{m}$, $d_{10}=170\mu\text{m}$, $d_{50}=650\mu\text{m}$ e $d_{90}=1830\mu\text{m}$.

Os sedimentos utilizados como descarga sólida, para os ensaios onde foram adicionados sedimentos de granulometria extensa, eram do mesmo solo utilizado nas caixas, enquanto que, para os ensaios onde foram adicionados sedimentos com granulometria

uniforme, foram utilizadas esferas de vidro com granulometria equivalentes a silte grosso ($39\mu\text{m}$) e areia grossa ($510\mu\text{m}$).

Os tratamentos dos ensaios encontram-se listados na Tabela 4.1. O delineamento experimental utilizado foi completamente casualizado onde cada tratamento foi repetido três vezes.

Tabela 4.1 Condições experimentais dos ensaios onde foram adicionados sedimentos de granulometria extensa e uniforme.

q_s g s^{-1}	Tipo de sedimento	Q_{entrada} $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	I m m^{-1}
0	solo	0,000122	0,05
2,03	solo	0,000122	0,05
3,81	solo	0,000122	0,05
6,13	solo	0,000122	0,05
7,49	solo	0,000122	0,05
0,9	esferas finas	0,000122	0,05
0,8	esferas grossas	0,000122	0,05
3,3	esferas finas	0,000122	0,05
3,1	esferas grossas	0,000122	0,05

Os ensaios referentes às adições de granulometria extensa e de granulometria uniforme seguiram o seguinte procedimento: após a conexão das caixas, que unidas formavam um canal retangular de 7,6m de comprimento, eram depositadas dentro de cada caixa, quantidades correspondentes a 1166g (caixa com 0,25m de comprimento), 2333g (caixa com 0,50m de comprimento) e 4666g (caixa com 1,0m de comprimento) de solo seco e peneirado. A superfície do solo era nivelada e levemente compactada, formando uma camada de solo de 0,04m com uma massa específica de aproximadamente $1,2\text{Mg m}^{-3}$. Após a preparação das caixas, o canal era colocado em nível e enchido com água de forma a nivelar a linha de água com a superfície do solo contido nas caixas (Figura 4.13). Dessa maneira, o solo no interior das caixas era saturado por inundação, uma vez que no fundo das caixas havia uma série de furos que permitiam o livre fluxo da água para dentro das caixas, durante a saturação, e a drenagem livre, durante o ensaio. O tempo de saturação utilizado em todos os ensaios foi de um dia.



Figura 4.13 Sistema de caixas sendo saturado no canal.

4.2.3. Procedimento experimental

Trinta minutos antes de iniciar o ensaio, a água do canal era retirada e sua declividade era ajustada. Após a calibração das descargas líquidas (Figura 4.14) e sólidas (Figura 4.15), iniciava-se o ensaio com a adição simultânea dessas duas descargas que eram mantidas constantes durante um tempo de aproximadamente 190s. A duração do ensaio foi definida com base em ensaios preliminares onde se procurou determinar um tempo em que o escoamento não removesse o solo até o fundo da caixa, pois essa situação alteraria as condições do escoamento. Durante o ensaio, amostras do escoamento eram coletadas continuamente em garrafas (Figura 4.16) na parte final do canal. No mesmo instante em que era realizada a amostragem da descarga sólida, era determinada também a velocidade do escoamento utilizando-se o método da tinta fluorescente aplicado no trecho do canal compreendido entre 0,60 e 4,60m (Figura 4.17). Os valores de velocidade foram corrigidos através de um fator de correção (α), determinado a partir da equação 4.2 definida no item 4.1.1.

Terminado o tempo de ensaio, os fornecimentos de água e de sedimentos para o canal eram interrompidos, sendo esse intervalo de tempo considerado como tempo onde o escoamento permanecia constante. O tempo total do ensaio foi considerado como sendo o intervalo até o momento em que o escoamento cessava no final do canal. Na seqüência, era feita uma descrição da morfologia da superfície do solo, procurando-se descrever as deformações sofridas pelo contorno sólido.

A determinação da concentração de sedimentos no escoamento foi realizada com base nas amostras do escoamento coletadas em recipientes plásticos durante o evento, as quais, após o ensaio, eram pesadas e colocadas numa solução de sulfato de alumínio e deixadas para decantar por uma noite. No dia seguinte, a água dos recipientes era retirada e o resíduo colocado para secar em estufa por um período de aproximadamente 48 horas, para obter a massa de sedimentos. A descarga sólida foi calculada através do produto da vazão pela concentração de sedimentos.

Após a descrição qualitativa da morfologia, as caixas eram separadas (Figura 4.18) e colocadas em estufa para secarem a 60°C por um período de aproximadamente 4 dias até atingirem peso constante. Para estabelecer o momento em que as caixas deveriam ser retiradas da estufa, utilizou-se uma caixa-testemunha com 0,10m de largura, 0,10m de altura e 1,0m de comprimento preparada de forma igual às demais que faziam parte do conjunto, colocada ao seu lado, mas sem sofrer ação do escoamento (Figura 4.11). Ao final de cada ensaio, a caixa testemunha era colocada na estufa até que atingisse o peso seco que apresentava antes do ensaio, indicando que as outras caixas também poderiam ser retiradas pois o material já se encontrava seco. As caixas eram então pesadas e, por diferença do peso antes e depois do ensaio considerando o tempo total, era possível determinar as taxas de desagregação e de deposição ao longo do canal.

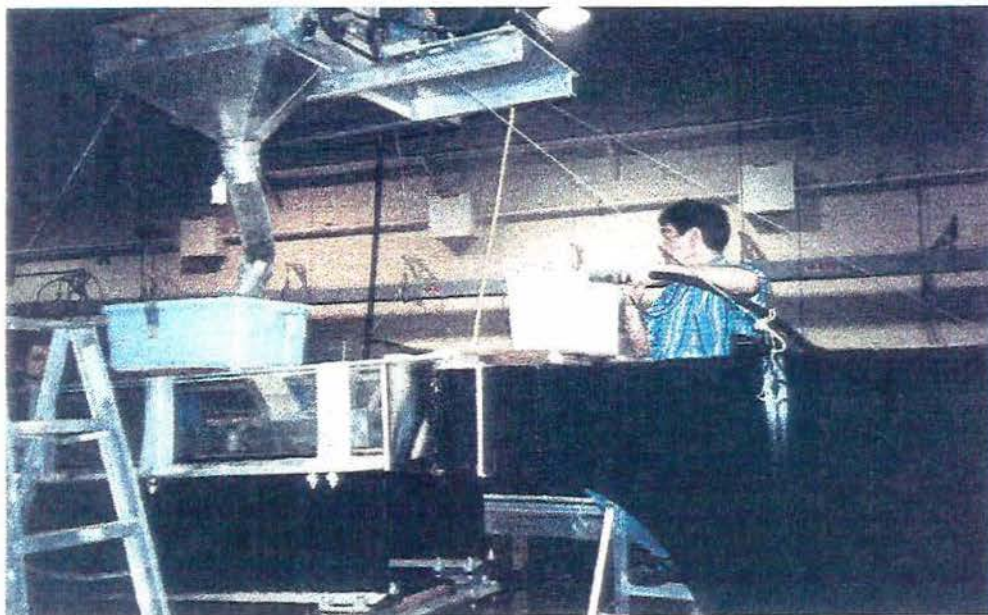


Figura 4.14 Calibração da vazão efetuada em cada ensaio.



Figura 4.15 Calibração da descarga sólida efetuada em cada ensaio.

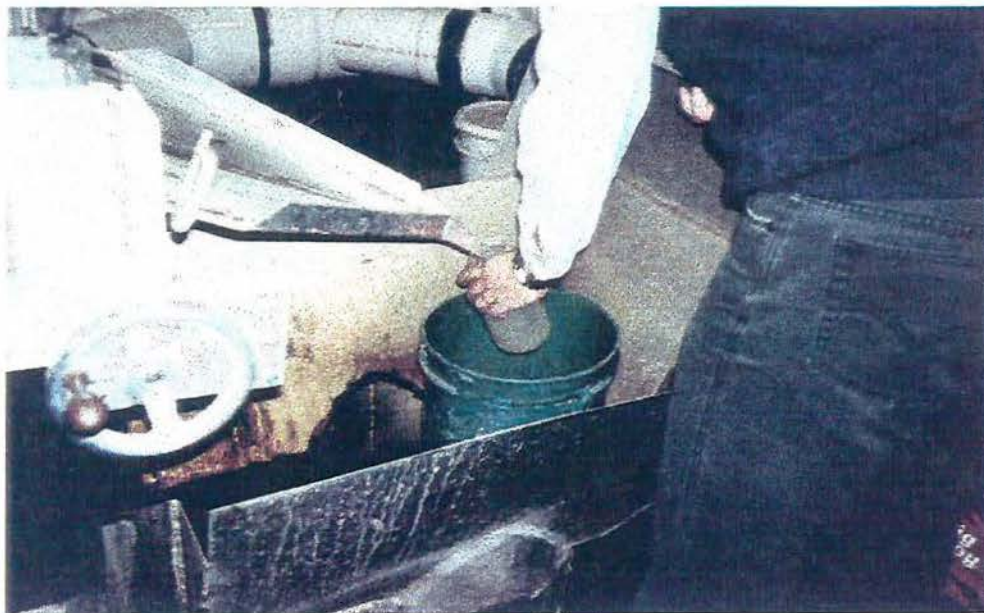


Figura 4.16 Amostragem do escoamento em recipientes plásticos para determinação da concentração de sedimentos.



Figura 4.17 Determinação da velocidade do escoamento com uso da tinta traçadora.



Figura 4.18 Separação das caixas para serem colocadas em estufa.

Somente para os ensaios onde foram adicionados sedimentos de granulometria extensa, parte do sedimento transportado até o final do canal e não coletado nas garrafas era lançado em um balde, sendo este material amostrado para posterior determinação da granulometria e da velocidade de sedimentação. Para a caracterização granulométrica dos sedimentos, foi determinado o tamanho de partículas pelo método de peneiramento, utilizando-se o seguinte procedimento: os sedimentos úmidos, coletados no balde logo após o término do ensaio, eram peneirados em um conjunto de peneiras (2000, 1000, 500, 250, 210, 105 e 53 μ m de malha) com o uso de um fraco jato de água para auxiliar a passagem do

sedimento entre as malhas. As diferentes frações eram colocadas para secar em estufa a uma temperatura de 60°C até atingirem um peso constante.

A velocidade de decantação dos sedimentos secos foi estabelecida para as diferentes frações dos sedimentos que ficaram retidos nas peneiras após secagem em estufa. Essa determinação foi realizada com um tubo de Griffith, seguindo procedimento experimental sugerido por Hairsine e McTainsh (1986). Considerando-se que a granulometria do material é composta, basicamente, de partículas primárias (quartzo) e microagregados, é de se esperar que a secagem dos sedimentos em estufa não tenha alterado a granulometria dos materiais utilizados na determinação da velocidade de sedimentação.

O tratamento estatístico dos dados foi realizado com base na análise de variância considerando-se um delineamento completamente casualizado.

5. Resultados e Discussões

5.1. Experimento 1: Características hidráulicas do escoamento e processo de desagregação do solo afetados pela adição de sedimentos

Conforme já comentado em materiais e métodos, o experimento 1 foi realizado em duas etapas onde na primeira procurou-se selecionar uma vazão onde a capacidade de transporte de sedimentos fosse conhecida e logo a seguir foram adicionadas quantidades crescentes de sedimentos, para verificar os efeitos da descarga sólida sobre as características hidráulicas do escoamento e sobre o processo de desagregação do solo.

5.1.1. Determinação da capacidade de transporte de sedimentos

Na Tabela 5.1 constam os resultados da caracterização do escoamento para as diferentes vazões ensaiadas e o tipo de transporte dos sedimentos. Verifica-se que o regime do escoamento em todas as vazões ensaiadas é o supercrítico turbulento ($Re > 2000$ e $Fr > 1$) e que a adição de sedimentos, resultou em geral em uma pequena redução da velocidade média e num aumento da altura da lâmina de água. O tipo de transporte que consta na Tabela 5.1 foi determinado pelo critério de Raudkiwi (1990) que indica que se $2 < w_0/u_* < 6$ é arraste, $0,6 < w_0/u_* < 2$ é saltação e $w_0/u_* < 0,6$ é suspensão.

Tabela 5.1 Características hidráulicas e determinação do tipo de transporte de sedimentos para condições de 3% de declive.

Q $m^3 \cdot s^{-1}$	C_{g1} g/l	t °C	v_s/u_*	Tipo de transporte ¹	Sem sedimentos				Com sedimentos			
					h m	v $m \cdot s^{-1}$	Re	Fr	h m	v $m \cdot s^{-1}$	Re	Fr
0.0025	22,64	25,00	1.89	saltação	0.0091	0.46	4670	1.6	0.0095	0.45	4798	1.5
0,0020	25,42	25,00	1.96	saltação	0.0082	0.43	3947	1.6	0.0088	0.41	4024	1.4
0.0017	29,12	25.75	2.02	arraste	0.0076	0.39	3316	1.5	0.0083	0.37	3424	1.3
0.0016	29,79	26.05	2.06	arraste	0.0072	0.36	2901	1.3	0.0080	0.34	3033	1.2
0.0015	30,03	26.75	2.06	arraste	0.0073	0.37	2985	1.5	0.0080	0.36	3208	1.4
0.0010	40,93	27,30	2.25	arraste	0.0064	0.30	2151	1.2	0.0067	0.30	2252	1.2

⁽¹⁾ Conforme critério de Raudkiwi (1990).

Para vazões próximas da capacidade de transporte, observações visuais realizadas durante os ensaios indicaram que ocorria a formação de pequenos depósitos que evoluíam para uma condição de depósito contínuo à medida que a vazão ensaiada era diminuída. A observação visual da formação de depósito é um critério utilizado na determinação da

capacidade de transporte por arraste em canais de fundo fixo. Com base nesse critério, define-se que a capacidade de transporte é atingida quando ocorre um depósito contínuo e uniforme, com espessura igual a um grão (Costa, 1974; Almeida, 1977; Garcia, 1983; Medeiros, 1986 e Silvestrini, 1991).

Entretanto, neste trabalho decidiu-se adotar um novo critério para determinação da capacidade de transporte onde é levado em consideração a quantificação dos sedimentos depositados conforme descrito no parágrafo seguinte.

Os dados referentes a massa de sedimentos coletadas no exutório do canal e a massa de sedimentos depositada durante o ensaio, constam na Tabela 5.2. Partindo desses valores, foi calculado a porcentagem de depósito sobre o sedimento total (depositado + transportado) e construído um gráfico (Figura 5.1) relacionando a vazão com a porcentagem de depósito.

Tabela 5.2 Valores de vazão (Q), descarga sólida (q_s) injetada e massa de sedimento transportados e depositada para as diferentes vazões ensaiadas.

Q	q_s	Sedimentos transportados	Sedimentos depositados	Sedimentos total	Deposição observada
$m^3 s^{-1}$	$g s^{-1}$	g	g	g	
0,0025	58,4	14426	699 (4,62%)	15125	Não
0,0020	58,4	15514	733 (4,51%)	16247	Não
0,0017	58,4	15559	715 (4,39%)	16274	Não
0,0016	58,4	15375	886 (5,45%)	16261	Início
0,0015	58,4	15239	932 (5,76%)	16171	Sim
0,0010	58,4	11914	3792 (24,14%)	15706	Plena

Pela Figura 5.1 verifica-se a existência de dois grupos de pontos distintos. Para vazões acima de $0,0015m^3 s^{-1}$ esses pontos, cujos valores são semelhantes, estão associados à baixa porcentagem de depósito. Por outro lado, nas vazões menores que $0,0015m^3 s^{-1}$ verifica-se um incremento da porcentagem de depósito. O critério estabelecido para determinar a capacidade de transporte foi o de identificar, de forma gráfica, a vazão em que ocorreu o início do depósito e considerá-la como crítica. Para determinar esta condição foram ajustados a sentimento uma reta para cada grupo de pontos (baixa porcentagem e alta porcentagem de depósito). Estabeleceu-se, então, que a vazão crítica de início de depósito corresponde ao ponto de cruzamento das retas, correspondendo ao valor de $0,0016m^3 s^{-1}$.

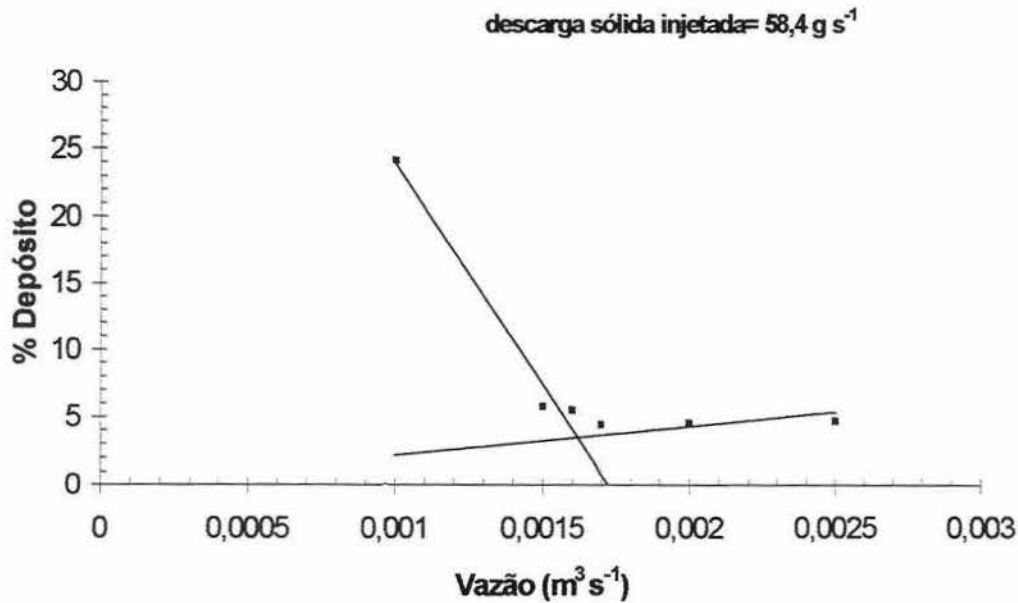


Figura 5.1 Relação entre a vazão e a porcentagem de depósito para uma condição de declive de 3%.

É pertinente considerar que os resultados referentes tanto ao regime do escoamento como ao tipo de transporte dos sedimentos estudados em condições de laboratório sejam capazes de reproduzir, pelo menos em parte, a verdade de campo. No caso da vazão crítica selecionada ($0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$) verificamos pela Tabela 5.1 que o regime do escoamento foi o supercrítico turbulento, enquanto que o transporte de sedimentos é realizado por arraste. Essas duas condições em geral condizem com a situação verificada a campo (supercrítico de transição a turbulento) nos escoamentos concentrados em sulcos.

Para verificar a ordem de grandeza das diferenças encontradas entre a capacidade de transporte de sedimentos determinada experimentalmente e a estimada, foram avaliadas equações de transporte de sedimentos utilizadas nos modelos de predição de erosão. Dessa forma, a capacidade de transporte foi estimada por quatro equações:

- a) equação de Yalin (Yalin, 1963) (equação 5.1) selecionada por ser a equação mais empregada nos modelos de predição de erosão sendo atualmente utilizada no modelo WEPP;
- b) equação de Nearing (Nearing et al., 1997) (equação 5.2) selecionada porque apresenta um bom potencial para uso em modelos probabilísticos de predição de erosão e ter sido derivada a partir de dados experimentais de erosão em sulco obtidos a campo e em laboratório;

- c) equação utilizada no modelo de predição de erosão EUROSEM (equação 5.3) (Morgan et al., 1998);
- d) equação de Yang (Yang, 1972) (equação 5.4) selecionada por ser também muito utilizada nos modelos de predição de erosão;

As equações selecionadas diferenciam-se quanto aos parâmetros hidráulicos utilizados na sua derivação (tensão cisalhante, potência do escoamento e potência unitária), variáveis hidráulicas utilizadas (declividade, descarga líquida), tamanho de sedimentos e procedimento experimental (determinações em rios, canais, sulcos e canais de laboratório). A equação de Yalin (Yalin, 1963) é baseada na tensão cisalhante do escoamento (τ) e foi desenvolvida a partir de experimentos realizados em rios e canais onde a faixa granulométrica dos sedimentos utilizados variaram entre 90 μm a 7000 μm , sendo uma equação recomendada para cálculo da descarga sólida transportada por arraste. A equação de Nearing (Nearing et al., 1997) utiliza como parâmetro hidráulico a potência do escoamento (Ω), sendo derivada a partir de dados obtidos em experimentos de erosão em sulco conduzidos a campo e em laboratório, utilizando sedimentos com fração granulométrica extensa (partículas do tamanho argila a areia grossa) Por outro lado, as equações do EUROSEM (Morgan et al., 1998) e Yang (Yang, 1972) são baseadas na potência unitária do escoamento (ω). A equação de Yang, utilizada para calcular descarga total, baseou-se em mais de 1000 dados experimentais obtidos em laboratório, rios e canais utilizando sedimentos com diâmetros variando de 300 μm a 7000 μm . A equação do EUROSEM (Morgan et al., 1998) foi derivada a partir de experimentos sobre erosão em sulco realizados a campo e em laboratório, onde foram utilizados materiais com diâmetros que variam entre 50 μm a 250 μm . Com base nessa faixa granulométrica, deduz-se que essa equação é também capaz de estimar parte dos sedimentos que são transportados por suspensão e arraste, porém dentro de uma gama de diâmetros mais finos que a equação de Yang (Yang, 1972).

Na seqüência encontram-se apresentadas as equações citadas.

- a) equação de Yalin (Yalin, 1963)

$$\frac{T_c}{(SG-1)d\sqrt{\rho}\sqrt{\tau_c}} = 0,635,8 \left[1 - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta) \right] \quad 5.1$$

onde $SG = \frac{\gamma_s}{\gamma}$, $\beta = 2,45(SG)^{-0,4}(Y_c)^{0,5}\delta$, Y_c é a tensão cisalhante crítica retirada do diagrama de

Shields, $\delta = \frac{Y}{Y_c} - 1$, Y é a tensão cisalhante adimensionalizada.

b) equação de Nearing (Nearing et al., 1997)

$$\log(T_c) = 34,47 + \frac{38,61 \exp[0,845 + 0,412 \log(\Omega)]}{1 + \exp[0,845 + 0,412 \log(\Omega)]} \quad 5.2$$

c) equação do EUROSEM (Morgan, et al., 1998)

$$T_c = c(\omega - \omega_c)^\eta \quad 5.3$$

onde $c = \left[\frac{d_{50} + 5}{0,32} \right]^{-0,6}$, $\eta = \left[\frac{d_{50} + 5}{300} \right]^{0,25}$, ω_c é o valor crítico da potência unitária do escoamento e d_{50} é o valor do diâmetro médio de partícula (μm).

d) equação de Yang (Yang, 1972)

$$\log T_c = (6,023 - 0,247d_{50} - 1,336h) + (1,246 - 0,438h) \log \omega \quad 5.4$$

onde $\log T_c$ é a capacidade de transporte de sedimentos (ppm), d_{50} é o valor do diâmetro médio de partícula (mm) e h é a altura do escoamento (pés).

Os valores calculados para a capacidade de transporte da vazão de $0,0016\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ através do emprego das equações Yalin, Nearing, EUROSEM e Yang foram respectivamente de $32,8\text{g s}^{-1}$, 30g s^{-1} , $13,4\text{g s}^{-1}$ e $25,2\text{g s}^{-1}$ enquanto que o valor determinado experimentalmente foi de $58,4\text{g s}^{-1}$. Com base nesses resultados, verifica-se que todos os valores calculados subestimaram a capacidade de transporte, principalmente o calculado pelo modelo EUROSEM no qual a diferença entre o valor estimado e o determinado experimentalmente foi de quase 80%, enquanto que, para as equações de Yalin e Nearing et al. essa diferença foi de aproximadamente 40%. No caso da equação do EUROSEM (Morgan et al., 1998), essa diferença poderia ser atribuída ao fato de que a granulometria do material utilizado é diferente da faixa granulométrica dos sedimentos que fizeram parte dos dados utilizados para derivar essa equação, ou seja, não é nenhuma surpresa constatar que uma equação derivada para sedimentos finos (que se deslocam preferencialmente por suspensão) não seja capaz de estimar uma descarga sólida de sedimentos transportados por arraste.

Para a equação de Yang, a diferença entre o valor determinado experimentalmente e o valor calculado foi de 57%. Se considerarmos que as equações do EUROSEM e de Yang são baseadas no mesmo parâmetro hidráulico (potência unitária do escoamento), veremos que a diferença básica entre elas é que a equação Yang é recomendada para estimar a capacidade de transporte de sedimentos quando a granulometria média dos sedimentos é menor que $2000\mu\text{m}$ enquanto que a equação do EUROSEM a faixa granulométrica de uso é mais restrita ($50\mu\text{m}$ a $250\mu\text{m}$).

Dos valores calculados com o uso de equações, os mais próximos do valor determinado experimentalmente foram os fornecidos pelas equações de Yalin e a de Nearing et al., os quais conforme já comentado subestimaram a capacidade de transporte em, aproximadamente, 40%. Tal resultado pode ser explicado, no caso da equação de Yalin, pela variável hidráulica que é utilizada para estimar a capacidade de transporte, a altura do escoamento, que, na condição do canal de fundo fixo, é determinada com uso da ponta linimétrica, sendo esse valor bastante representativo da condição do escoamento. No caso da equação de Nearing, a variável utilizada é a potência do escoamento, determinada pela da vazão unitária. Também deve-se salientar que o sedimento utilizado no experimento encontra-se dentro da faixa granulométrica dos sedimentos que foram utilizados para derivar as equações de Yalin e Nearing.

A diferença de 40% entre o valor determinado experimentalmente e o determinado pelas equações de Yalin e de Nearing et al. mostra que, mesmo quando existe condições favoráveis ao emprego das equações, o erro na estimativa da capacidade de transporte é razoável. É provável que esta imprecisão deva-se ao carácter empírico das equações que são derivadas a partir de certas condições hidráulicas e de sedimentos que não abarcam o universo de situações em que as equações são utilizadas. Entretanto, é necessário considerar que a estimativa incorreta da capacidade de transporte de sedimentos acarreta também um erro na estimativa das taxas de desagregação do solo pelos modelos de predição de erosão, uma vez que os cálculos das taxas de desagregação do solo são baseados na capacidade de transporte.

5.1.2. Determinação dos efeitos de adições crescentes de sedimentos sobre as características hidráulicas do escoamento

Conhecida a vazão ($0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$) capaz de transportar a descarga sólida injetada ($58,4\text{g s}^{-1}$) realizou-se a segunda etapa do trabalho, fazendo variar o aporte sólido e fixando-se a vazão. Com esse procedimento foram estudados os efeitos da adição de sedimentos sobre as características hidráulicas do escoamento e sobre a desagregação do solo. Esses dois aspectos serão interpretados separadamente para facilitar sua análise. No final serão feitas inferências sobre a interação dos efeitos das condições hidráulicas alteradas pelos sedimentos, as quais afetam os processos de desagregação do solo.

Os efeitos das adições crescentes de sedimentos sobre as características hidráulicas do escoamento foram avaliadas através da medição da altura da lâmina de água (h) e da

velocidade (v) do escoamento. Essas duas variáveis são importantes para caracterizar o escoamento uma vez que muitas relações hidráulicas são derivadas a partir dessas.

Nas Tabelas 5.3; 5.4; 5.5 e 5.6 são apresentados as condições experimentais utilizadas bem como as características hidráulicas que foram medidas e as que foram derivadas a partir da altura da lâmina de água e da velocidade do escoamento.

O tipo de regime verificado em todos tratamentos foi o supercrítico turbulento (Tabela 5.3). Essa condição representa o regime que normalmente ocorre nos escoamentos concentrados em sulcos onde a altura da lâmina de água é muito pequena e a declividade e a velocidade do escoamento são elevadas (Aziz e Scott, 1989). Em relação às condições experimentais mostradas pela Tabela 5.3, verifica-se que as adições de sedimentos utilizadas no experimento $10,4\text{g s}^{-1}$; 16g s^{-1} ; $26,1\text{g s}^{-1}$; $35,3\text{g s}^{-1}$; $47,2\text{g s}^{-1}$; $61,1\text{g s}^{-1}$ e $75,5\text{g s}^{-1}$ corresponderam a valores equivalentes a 18%, 27%, 45%, 60%, 80%, 104% e 129% da capacidade de transporte do escoamento que foi determinada experimentalmente na primeira fase desse trabalho.

Tabela 5.3 Condições experimentais utilizadas, propriedades físicas da água e regime do escoamento.

Q	I	q_s	$(q_s/Tc)100$	μ	ρ	γ	Sem sedimento		Com sedimento	
							Re	Fr	Re	Fr
$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	m m^{-1}	g s^{-1}	%	N s m^{-2}	kg m^{-3}	N m^{-3}				
0,0016	0,03	10,4	18	0,000001	998	9790	2965	1,49	2989	2,01
0,0016	0,03	16,0	27	0,000001	998	9790	2744	1,41	2897	1,98
0,0016	0,03	26,1	45	0,000001	998	9790	2873	1,43	2897	1,95
0,0016	0,03	35,3	60	0,00000087	997	9781	3283	1,43	3352	1,9
0,0016	0,03	47,2	80	0,00000087	997	9781	3266	1,41	3524	1,92
0,0016	0,03	61,1	104	0,00000087	997	9781	3326	1,43	3610	1,94
0,0016	0,03	75,5	129	0,00000087	997	9781	3326	1,43	3450	1,77

As variáveis medidas durante o ensaio, na ausência e presença de sedimentos, foram a altura e a velocidade do escoamento, as quais encontram-se descritas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 Características hidráulicas medidas e velocidades estimadas pela altura da lâmina de água e pela equação do perfil logarítmico.

q_s	Sem sedimento				Com sedimento			
	h	v	v	v	h	v	v	v
	medido	medido	estimado ⁽¹⁾	estimado ⁽²⁾	medido	medido	estimado ⁽¹⁾	estimado ⁽²⁾
$g\ s^{-1}$	m	$m\ s^{-1}$	$m\ s^{-1}$	$m\ s^{-1}$	m	$m\ s^{-1}$	$m\ s^{-1}$	$m\ s^{-1}$
10,4	0,0075	0,40	0,35	0,31	0,0077	0,39	0,34	0,31
16,0	0,0072	0,38	0,37	0,31	0,0076	0,38	0,35	0,31
26,1	0,0074	0,39	0,36	0,31	0,0076	0,38	0,35	0,30
35,3	0,0075	0,39	0,35	0,31	0,0078	0,38	0,34	0,30
47,2	0,0076	0,38	0,35	0,31	0,0082	0,38	0,32	0,31
61,1	0,0076	0,39	0,35	0,31	0,0081	0,40	0,33	0,32
75,5	0,0076	0,39	0,35	0,31	0,0085	0,36	0,31	0,31

⁽¹⁾ Estimado pela divisão entre a vazão e a área da seção ($v = \frac{Q}{A}$)

⁽²⁾ Estimado a partir do perfil logarítmico das velocidades (equação 5.5)

O efeito da adição de sedimentos sobre a altura da lâmina de água pode ser observado na Figura 5.2. Verifica-se que a altura da lâmina de água em presença de sedimentos foi sempre superior à altura da lâmina de água sem sedimentos. O efeito da adição crescente de sedimento, por outro lado, mostrou que, para adições acima de $35,3\ g\ s^{-1}$, ocorreu uma elevação súbita da altura da lâmina de água. A elevação da lâmina de água deve-se a dois aspectos que ocorrem simultaneamente: a compensação da redução de velocidade devido ao aumento da resistência oferecida ao escoamento, e a sobre-elevação da lâmina de água causada pelos depósitos de sedimentos observados para injeções de sedimento próximas e superiores à capacidade de transporte ($60\ g\ s^{-1}$). É necessário considerar também que, em condições de regime supercrítico turbulento, a linha de água apresenta um comportamento bastante instável em função dos efeitos localizados de aceleração/desaceleração do escoamento devido aos efeitos de rugosidade e depósitos de sedimentos. Assim os valores que constam na Tabela 5.4 representam um valor médio da altura do escoamento determinado a partir da leitura das três seções do canal, admitindo-se que a linha de água seja uniforme. O efeito da elevação da altura da lâmina de água pela adição crescente de sedimentos também foi observada por Aziz e Scott (1989), sendo a elevação atribuída à redução da velocidade do escoamento, uma vez que não foram verificados depósitos de sedimento alterando a forma de fundo.

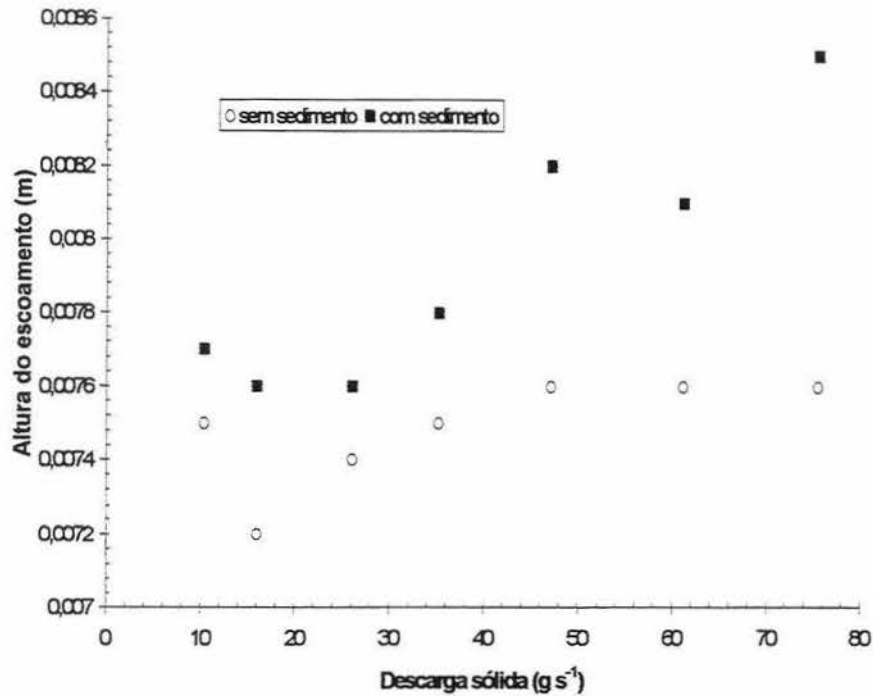


Figura 5.2. Efeito da adição de sedimentos no escoamento sobre a altura do escoamento para $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$.

A velocidade do escoamento, medida com uso da tinta, foi comparada com a velocidade do escoamento, calculada pela divisão entre a vazão e o produto da largura do canal pela altura da lâmina de água e através do perfil logarítmico determinado com uso da equação 5.5 (Simon and Sentürk, 1977). A velocidade estimada com uso do perfil de velocidades, que consta na Tabela 5.4, representa a velocidade média do perfil correspondente à altura máxima da lâmina de água.

$$\frac{v}{u_*} = 5,75 \log \frac{y}{k_s} + B \quad 5.5$$

onde: y é altura (m) do escoamento, k_s é a rugosidade de superfície representada por d_{65} e B é uma constante de integração retirada do diagrama de Brownlie (Chang, 1988).

Pela Tabela 5.4 verifica-se que os valores das velocidades medidas foram ligeiramente superiores aos valores estimados e que na média essa diferença foi de aproximadamente 10% para velocidade estimada a partir da altura da lâmina de água e de 20% para velocidade estimada pelo perfil de velocidade. É possível que essa diferença esteja relacionada com o fator de correção (α) que foi utilizado para corrigir a velocidade medida com a tinta, uma vez que a determinação desse fator se baseia em uma equação que foi ajustada com base em dados experimentais (Li et al., 1996) diferentes dos que foram utilizados neste experimento. Situação

semelhante foi observada por Govers (1992) onde este autor verificou que a velocidade medida com tinta em média apresentava um valor 6% maior que o valor da velocidade derivada a partir da divisão entre a vazão e a área da seção.

Em relação ao efeito da adição crescente de sedimentos sobre a velocidade medida, observa-se pela Tabela 5.4 que os valores quase não se alteraram. As velocidades do escoamento na presença foram similares aqueles na ausência de sedimentos, existindo uma tendência dos valores serem menores na presença de sedimentos, à exceção do tratamento onde a adição era de $61,1\text{g s}^{-1}$ (valor equivalente a 104% da capacidade de transporte). Nesse tratamento, a velocidade do escoamento na presença de sedimentos foi maior que na ausência havendo duas possibilidades para explicar essa condição. A primeira, que tenha ocorrido algum erro durante as medições, o que é pouco provável, pois os valores encontrados nas quatro repetições foram bem semelhantes. A segunda hipótese, seria a de que a existência de depósitos isolados de sedimentos ao longo do canal poderia ter favorecido a formação de caminhos preferenciais ou a concentração do escoamento e, conseqüentemente, um aumento da velocidade. Seria de se esperar então que adição de sedimentos a uma taxa de $75,5\text{g s}^{-1}$ deveria ocorrer o mesmo ou seja um aumento da velocidade devido a formação de caminhos preferenciais devido a formação dos depósitos isolados de sedimentos. Entretanto, verifica-se pela Tabela 5.4 que a velocidade do escoamento medida quando da adição de $75,5\text{g s}^{-1}$ foi menor em presença de sedimentos. Nesse caso, observações visuais durante o ensaio mostravam que, para esta taxa de adição de sedimentos, os depósitos de sedimentos eram contínuos sobre o fundo, e com isto os efeitos dos caminhos preferenciais eram reduzidos.

Por outro lado, os valores de velocidade que foram estimados pela altura da lâmina de água mostraram uma tendência de redução da velocidade à medida que aumenta a taxa de adição de sedimentos. Esta condição deve-se ao fato de que a velocidade foi estimada com base na altura do escoamento, que por sua vez é uma variável que foi mais sensível aos efeitos provocados pela adição de sedimentos ao escoamento.

A redução da velocidade do escoamento provocada pela adição dos sedimentos ocorre principalmente devido aos efeitos de resistência ao escoamento causado pelo aumento da rugosidade dos sedimentos em trânsito (Li e Abrahams, 1997 e Abrahams e Li, 1998) e também devido à obstrução causada pelos depósitos de sedimentos.

O efeito da adição de sedimentos sobre o aumento da resistência ao escoamento pode ser verificado na Tabela 5.5 através da análise do fator perda de carga (f). O fator perda de carga foi calculado para avaliar o efeito da resistência ao escoamento na ausência (f) e presença de sedimentos (f_t). A resistência ao escoamento na ausência de sedimentos é causada por efeitos rugosos oriundos da superfície da lixa que foi colada no fundo do canal ($d_{50}=500\mu\text{m}$), enquanto que, para a perda de carga na presença de sedimentos (f_t), soma-se o efeito da rugosidade do fundo mais a transferência de energia devido aos sedimentos em trânsito.

Pelos valores dos coeficientes de perda de carga mostrados na Tabela 5.5, verifica-se uma tendência de aumento do coeficiente de perda de carga (f_t) para as maiores adições de sedimentos com exceção da adição de $61,1\text{g s}^{-1}$ (104% da capacidade de transporte) onde o coeficiente diminui devido ao aumento da velocidade conforme já discutido no parágrafo anterior. Os efeitos de aumento de resistência ao escoamento devido à adição de sedimentos variou entre 5 a 20% da resistência total (rugosidade de fundo mais sedimentos em trânsito), sendo que o maior valor encontrado corresponde à adição de sedimentos equivalente a 129% da capacidade de transporte.

Tabela 5.5 Fator perda de carga (f) em função das adições de sedimentos.

q_s g s^{-1}	Tc %	Sem sedimento	Com sedimento	f_t/f	$\%f_s^{(1)}$
		f	f_t		
10,4	18	0,113	0,120	0,007	5,8
16	27	0,117	0,123	0,006	4,9
26,1	45	0,116	0,123	0,008	6,5
35,3	60	0,115	0,124	0,009	7,2
47,2	80	0,121	0,131	0,010	7,6
58,4	100	0,131	0,163	0,032	19,6
61,1	104	0,117	0,120	0,003	2,5
75,5	129	0,117	0,152	0,035	23,0

(1) $\left(\frac{f_t - f}{f_t}\right) 100$

Na Figura 5.3 são apresentados os valores da porcentagem de resistência devido à presença de sedimentos adicionados, comparando-os com os valores obtidos por Abrahams e Li (1998) em um experimento onde esses autores avaliaram os efeitos da presença de sedimentos transportados por saltação sobre a resistência ao escoamento. Pelo gráfico da Figura 5.3, verifica-se que os valores referentes à porcentagem de resistência devido aos

sedimentos adicionados aumentaram para as descargas próximas a 100% da capacidade de transporte, e que os valores experimentais situam-se na mesma ordem de grandeza dos valores obtidos por Abrahams e Li (1998). Para estimar a parcela do coeficiente devido à presença dos sedimentos na condição de descarga sólida equivalente a 100% da capacidade de transporte, Abrahams e Li (1998) ajustaram uma tendência aos pontos experimentais uma vez que no trabalho experimental as adições de sedimentos chegaram a um máximo de 80% da capacidade de transporte. Com este ajuste, Abrahams e Li (1998) verificaram que a parcela do coeficiente devido à presença de sedimentos estaria próximo a 30%. No caso deste trabalho, a determinação da porcentagem de resistência devido à presença de sedimentos na condição de descarga sólida equivalente a 100% da capacidade de transporte foi determinada a partir de dados experimentais.

Considerando-se no entanto que o valor da porcentagem de resistência devido à presença de sedimentos para condição da descarga sólida equivalente a 104% da capacidade de transporte apresentou um valor discrepante da tendência geral dos pontos da Figura 5.3. Desta forma, decidiu-se agregar a essa Figura um ponto adicional, cujo cálculo do fator perda de carga foi baseado nos dados de velocidade da vazão crítica de depósito ($0,0016\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) que constam na Tabela 5.1. Com este procedimento, confirma-se a tendência geral apresentada pela distribuição dos pontos da Figura 5.3 de um aumento da porcentagem da resistência devido a adição de sedimentos para condição equivalente a 100% da capacidade de transporte. Porém, permanece a dúvida sobre a tendência discrepante do ponto da descarga sólida equivalente a 104% da descarga sólida. As razões da discrepância verificada para condição de descarga sólida equivalente a 104% da capacidade de transporte observada na Figura 5.3 já foram discutidas anteriormente, quando se explicou que nessa condição ocorreu um aumento da velocidade do escoamento devido aos caminhos preferenciais formados pelos depósitos isolados de sedimentos.

Diferenças verificadas entre os valores obtidos experimentalmente e aqueles determinados no trabalho de Abrahams e Li (1998), especialmente na condição próxima a 100% da capacidade de transporte que constam na Figura 5.3, são bastante razoáveis por duas razões: a primeira tem a ver com os valores de velocidade do escoamento que foram determinados por anemometria no trabalho de Abrahams e Li (1998), enquanto que nesse experimento a velocidade foi determinada com uso da tinta; a segunda é que o valor referente à porcentagem de resistência devido aos sedimentos para condição equivalente a 100% da capacidade de transporte, do trabalho de Abrahams e Li (1998), representa apenas uma

tendência dos pontos enquanto que nesse trabalho referem-se a dados experimentais.

Um aspecto interessante mostrado pela Figura 5.3, tanto para os dados de Abrahams e Li (1998), como para este trabalho, refere-se a súbita elevação da porcentagem de resistência devido aos sedimentos para valores próximos da condição equivalente a 100% da capacidade de transporte. Este efeito poderia estar sugerindo que os depósitos isolados de sedimentos observados no experimento para adições equivalentes próximas a 100% da capacidade de transporte estariam obstruindo o fluxo do escoamento, promovendo uma ação de aceleração/desaceleração e impondo variações da trajetória do escoamento principal, resultando numa condição de aumento da resistência por efeitos de configuração em planta. Por outro lado, esses resultados sugerem também a necessidade de estudos mais detalhados dos efeitos dos sedimentos transportados sobre a resistência ao escoamento especialmente os efeitos que ocorrem na condição onde a descarga sólida encontra-se próximo da capacidade de transporte.

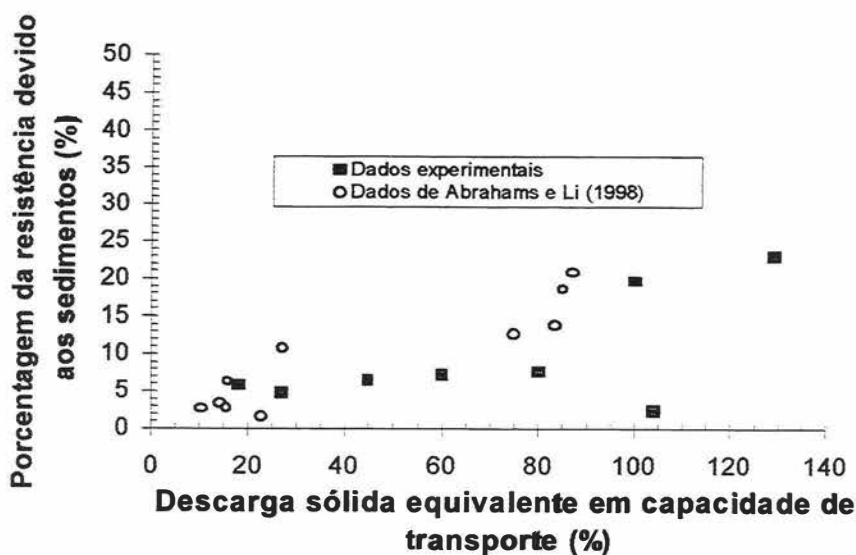


Figura 5.3 Gráfico da relação entre descarga sólida equivalente a capacidade de transporte e a porcentagem da resistência do escoamento devido ao transporte de sedimentos.

Dentro de uma abordagem global, a energia utilizada para vencer a resistência oferecida ao escoamento acaba dissipada sob a forma de calor (transferência de energia mecânica em térmica). De acordo com os dados mostrados na Tabela 5.5, é possível concluir que o aumento da adição de sedimentos estaria implicando em uma maior dissipação de energia do escoamento e que, de certa forma, estaria de acordo com as proposições teóricas de

Foster e Meyer (1972a) para a modelagem do processo erosivo, que preconizam que o transporte sólido conduz a menor parcela de energia disponível para o processo de desagregação. No entanto, essa é uma visão simplificada do processo, pois, na verdade, em uma abordagem mais complexa seria necessário avaliar os efeitos da presença de sedimentos sobre a variação da energia cinética turbulenta e sobre a viscosidade do escoamento, uma vez que esses dois fatores estão relacionados, respectivamente, ao transporte/desagregação de sedimentos e dissipação de energia.

Na Tabela 5.6 são apresentados também alguns parâmetros hidráulicos derivados visando analisar como foram afetados pelas mudanças relacionadas à alteração da altura da lâmina de água e da velocidade do escoamento causadas pela adição de sedimentos, bem como seu significado físico e suas implicações na predição da capacidade de transporte de sedimentos e da desagregação do solo.

Tabela 5.6 Características hidráulicas derivadas e tipo de transporte de sedimentos.

q_s $g\ s^{-1}$	v_s/u_*	Tipo de transporte ⁽¹⁾	Sem sedimento				Com sedimento			
			τ $N\ m^{-2}$	u_* $m\ s^{-1}$	Ω $kg\ s^{-1}$	ω $m\ s^{-1}$	τ $N\ m^{-2}$	u_* $m\ s^{-1}$	Ω $kg\ s^{-1}$	ω $m\ s^{-1}$
10,4	2,1	arraste	2,20	0,047	0,78	0,0119	2,26	0,048	0,78	0,0116
16,0	2,1	arraste	2,11	0,046	0,78	0,0114	2,23	0,047	0,78	0,0114
26,1	2,1	arraste	2,17	0,047	0,78	0,0116	2,23	0,047	0,78	0,0114
35,3	2,1	arraste	2,20	0,047	0,78	0,0117	2,29	0,048	0,78	0,0115
47,2	2,0	arraste	2,23	0,047	0,78	0,0115	2,41	0,049	0,78	0,0115
61,1	2,0	arraste	2,23	0,047	0,78	0,0117	2,38	0,049	0,78	0,0120
75,5	2,0	arraste	2,23	0,047	0,78	0,0117	2,49	0,050	0,78	0,0117

⁽¹⁾ Conforme critério de Raudikiwi (1990)

Em relação à tensão cisalhante do escoamento (τ), os valores da Tabela 5.6 mostram uma maior tensão cisalhante quando em presença de sedimentos e uma tendência de aumento dessa tensão para adições crescentes de sedimentos. Nesse caso, o aumento da tensão cisalhante deve-se a um aumento da altura da lâmina de água, já que no cálculo desse parâmetro é considerada essa variável. O mesmo comportamento foi observado para velocidade de cisalhamento (u_*), uma vez que a velocidade de cisalhamento é calculada a partir da tensão cisalhante. Já para potência do escoamento (Ω), os valores não se alteram pois a variável utilizada para o cálculo deste parâmetro é a vazão unitária (q) que, no caso de canal com paredes fixas, não se modifica.

Para potência unitária (ω), os valores mostraram que, em presença de sedimentos, ela foi menor, porém a tendência não foi muito clara para adições crescentes de sedimentos. Essa condição deve-se ao aspecto de que o cálculo da potência unitária é baseado na velocidade do escoamento e, portanto, esse parâmetro hidráulico irá refletir os efeitos dos sedimentos sobre a velocidade do escoamento.

Em termos de implicações práticas, as informações contidas na Tabela 5.6 permitem discutir alguns aspectos interessantes. Os valores calculados para tensão cisalhante (Tabela 5.6) mostram um aumento dessa tensão pelo efeito adição de sedimentos, o qual poderia ser interpretado como um aumento da capacidade de transporte ou da capacidade de desagregação do solo. Govers (1992) chama atenção para esse aspecto aparentemente contraditório e sugere, então, que as equações de transporte de sedimentos que utilizam a potência do escoamento e potência unitária do escoamento seriam mais promissoras por levarem em conta o efeito da velocidade média do escoamento ao invés da altura do escoamento. A velocidade do escoamento, por sua vez, é uma variável dependente das condições de rugosidade de grãos e de forma e, conseqüentemente, quando se utiliza um parâmetro hidráulico como a potência unitária do escoamento (produto da velocidade pelo declive), os efeitos de resistência ao escoamento devido ao transporte de grãos e da rugosidade superficial (resíduos de vegetação, agregados grandes, pedras e resistência de formas) estariam sendo considerados no processo. Além desse aspecto, soma-se o fato de que a velocidade do escoamento é muito mais fácil de ser determinada a campo do que a altura do escoamento. Dentro desse enfoque, então, a determinação da capacidade de transporte ou de desagregação dependeria, em um primeiro momento, de se conhecer para uma diversidade de vazões, declives e tipos de solos se realmente os parâmetros hidráulicos baseados na potência do escoamento apresentam um bom ajuste com a descarga sólida. Se isso for verdadeiro, então, em um segundo momento, seria necessário desenvolver estudos para se conhecer o comportamento da velocidade do escoamento sob condições diversas e relacionar a velocidade com alguns parâmetros hidráulicos e características de solo. Com base nesse conhecimento poder-se-ia estabelecer leis que permitiriam derivar equações capazes de estimar a velocidade do escoamento para condições de escoamento que ocorrem nos sulcos da mesma forma que hoje existem equações como a de Manning, por exemplo, que é utilizada para estimar a velocidade do escoamento para condições de rios e canais.

5.1.3. Determinação dos efeitos de adições crescentes de sedimentos sobre o processo de desagregação do solo

É necessário considerar, inicialmente, que o procedimento experimental utilizado para avaliar o efeito da adição de sedimentos sobre a desagregação do solo estaria representando a fase inicial da formação do sulco, ou seja, o momento em que se formam pequenas fossas por ação das correntes secundárias, conforme sugerido por Moss et al. (1982). Também é necessário considerar que as condições hidrodinâmicas do escoamento na região onde está posicionado o cilindro, que contém os agregados conforme pode ser visualizado pelas Figuras 5.5 a 5.12, são diferentes das condições hidrodinâmicas de fora dessa e, portanto, a discussão dos efeitos da adição de sedimentos sobre as características hidráulicas do escoamento realizada no item anterior só é válida para a região fora do cilindro. Esse aspecto é uma limitação do método experimental utilizado e, para ser superada, exigirá a realização do segundo experimento que compõe este estudo.

Na avaliação do efeito da adição de sedimentos sobre a desagregação do solo, serão abordados os valores das taxas de desagregação (Tabela 5.7), as imagens referentes ao instante em que o escoamento incide sobre o cilindro e provoca sua desagregação (Figura 5.5 a 5.12) e à morfologia da amostra deformada (Figuras 5.13 a 5.20)

Na Tabela 5.7 são apresentados os valores referentes ao tempo de exposição das amostras ao escoamento (tempo de desagregação) e as taxas de desagregação do solo. Verifica-se que, para as diferentes taxas de adição de sedimentos, o tempo de exposição variou num intervalo entre 3s a 5s, sendo esta variação atribuída às condições operacionais do experimento no momento de interromper o escoamento incidente sobre a amostra.

Tabela 5.7 Efeito da adição de sedimentos sobre a taxa de desagregação do solo para uma condição de $Q=0,0016 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $I=0,03 \text{ m m}^{-1}$.

q_s g s^{-1}	$(q_s/T_c)100$ %	Tempo de desagregação s	Taxa de desagregação $\text{g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Desvio padrão	$T_{ds}/T_{d\text{água}}$	Número de repetições
0	0	3,48	0,162	0,018		8
10,4	18	4,01	0,154	0,007	0,95	7
16,0	27	4,04	0,165	0,008	1,01	7
26,1	45	5,38	0,102	0,008	0,63	8
35,3	60	4,48	0,107	0,015	0,66	8
47,2	80	3,57	0,113	0,013	0,70	9
61,1	104	3,01	0,110	0,014	0,68	9
75,5	129	2,98	0,107	0,025	0,66	8

As deformações da linha de água no instante em que o escoamento incide sobre a amostra de solo pode ser vista pela seqüência de imagens mostradas nas Figuras 5.5 a 5.12 onde na seqüência dos quadros de cada figura procurou-se representar o instante inicial quando o escoamento incide sobre a região de ensaio, o desenvolvimento da onda de perturbação e o instante que precede a interrupção do escoamento. As seqüências de imagens em cada figura representa um intervalo de tempo que varia entre 3s a 5s, notando-se a instabilidade inicial do escoamento sobre o cilindro, que resulta em uma depressão da linha de água na posição à montante e a formação de uma onda em forma de rolo que cresce em altura ao mesmo tempo que se propaga no sentido de jusante para montante. Essa alteração do escoamento é provocada pela mudança da rugosidade do fundo devido à passagem de um fundo fixo para um fundo móvel. Nessa transição é gerada uma condição de instabilidade do escoamento que, por sua vez, dá origem à formação de correntes secundárias que são responsáveis pelo início do processo de desagregação que ocorre na amostra dentro do cilindro.

A seqüência de imagens das Figuras 5.5 a 5.12 mostra que a deformação da linha de água sobre o cilindro tende a diminuir para as taxas mais elevadas de adição de sedimentos, e também que o tempo de propagação da onda de perturbação é menor para as taxas de adições de $61,1 \text{ g s}^{-1}$ e $75,5 \text{ g s}^{-1}$. Esse aspecto explica porque o tempo de desagregação para as maiores taxas de desagregação foram menores uma vez que o critério utilizado para determinar o tempo em que o escoamento agia na região do ensaio era baseado no tempo de propagação da onda de perturbação, conforme comentado no capítulo referente a material e métodos. Se considerarmos que a altura da perturbação formada de alguma maneira possa refletir a intensidade das correntes secundárias, verifica-se que a adição de sedimentos reduziu a instabilidade do escoamento superficial. Esse aspecto é bem evidente quando se compara a

altura da onda de perturbação formada na condição onde não se adicionou sedimentos (Figura 5.5) com a onda de perturbação formada na condição onde adicionou-se sedimentos a uma taxa de $75,5\text{g s}^{-1}$ (Figura 5.12).

Em relação aos valores das taxas de desagregação (Tabela 5.7), verifica-se um aspecto bastante interessante. Os resultados mostram que as adições crescentes de sedimentos não resultaram em uma redução proporcional das taxas de desagregação como seria esperado. Os efeitos das adições crescentes mostraram que as taxas de desagregação apresentaram valores semelhantes para adições entre 0g s^{-1} a 16g s^{-1} e entre $26,1\text{g s}^{-1}$ a $75,5\text{g s}^{-1}$. No primeiro grupo (0g s^{-1} a 16g s^{-1}) as taxas de desagregação variaram entre $0,154\text{g cm}^2\text{ s}^{-1}$ a $0,165\text{g cm}^2\text{ s}^{-1}$. Para adições acima de $26,1\text{g s}^{-1}$, as taxas de desagregação foram reduzidas em média 30% e os valores variaram entre $0,102\text{g cm}^2\text{ s}^{-1}$ a $0,110\text{g cm}^2\text{ s}^{-1}$. Esse comportamento indica que ainda que houvesse uma relação de dependência entre as taxas de adição de sedimentos e as taxas de desagregação do solo essa resposta foi não linear. Os resultados sugerem que o efeito de diminuição da desagregação do solo estaria relacionada a uma quantidade mínima de sedimentos ($26,1\text{g s}^{-1}$), que, quando em trânsito dentro do cilindro, seria capaz de cobrir a superfície da amostra e protegê-la contra a desagregação provocada pela ação das correntes secundárias, explicando, então, porque adições superiores a $26,1\text{g s}^{-1}$ não causam uma supressão maior das taxas de desagregação.

Na Figura 5.4 procurou-se ilustrar, por meio de um desenho, a ação das correntes secundárias agindo sobre a superfície do solo contido dentro do cilindro formando uma fossa e o efeito de proteção dos sedimentos em trânsito. Dentro do cilindro, uma parte dos sedimentos era depositada dentro da fossa e outra transitava sobre os sedimentos depositados.

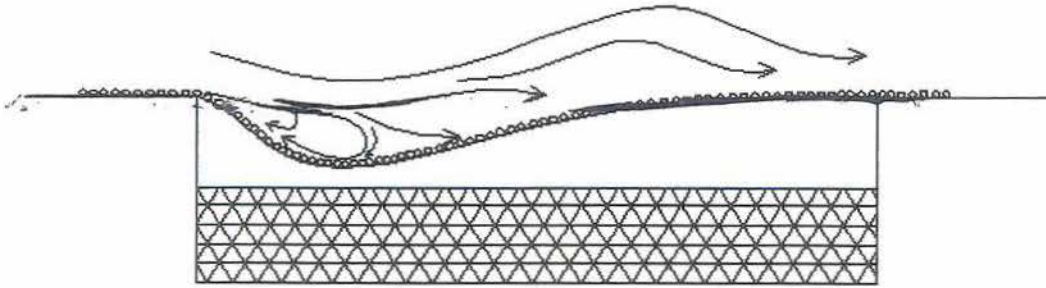


Figura 5.4 Desenho esquematizando a ação das correntes secundárias agindo sobre a superfície do solo dentro do cilindro e o efeito de proteção proporcionado pelos sedimentos depositados sobre a fossa e em trânsito.

Uma outra evidência do efeito de proteção dos sedimentos em trânsito na supressão da desagregação do cilindro pode ser verificada quando se realizavam alguns ensaios de observação onde a amostra de solo dentro do cilindro era submetida à adição de sedimentos e, após algum tempo, o fornecimento de sedimentos era cortado. Verificava-se, claramente, que, durante o trânsito de sedimentos, a desagregação era muito pequena e que, a partir do corte de fornecimento de sedimento, a superfície do solo dentro do cilindro era novamente descoberta, uma vez que os sedimentos em repouso dentro do cilindro entravam em movimento e, no instante em que parte dos sedimentos saiam do cilindro, expunham à superfície e a desagregação, voltava a ocorrer de uma forma muito intensa.

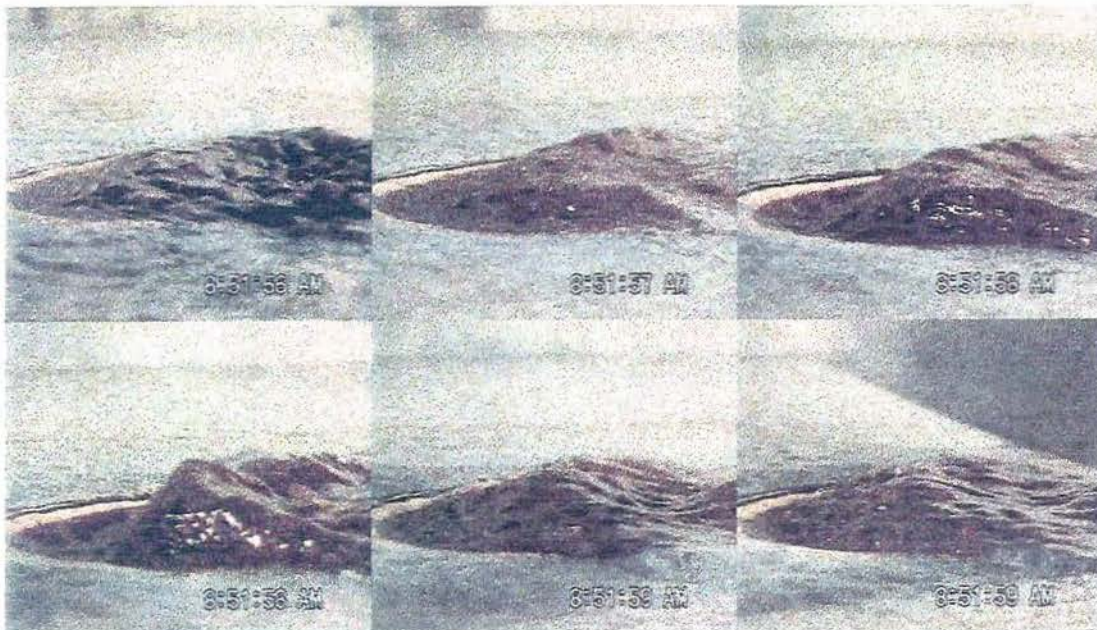


Figura 5.5 Sequência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaio no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=0\text{g s}^{-1}$, $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$.

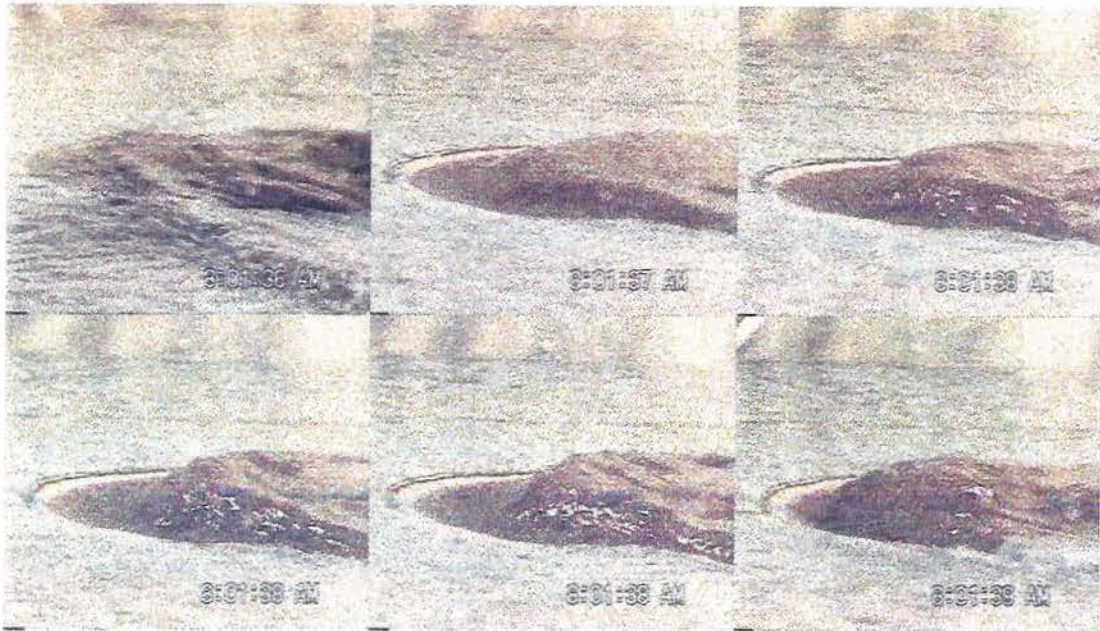


Figura 5.6 Seqüência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaios no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=10,4g s^{-1}$, $Q=0,0016m^3 s^{-1}$ e $I=0,03m m^{-1}$.

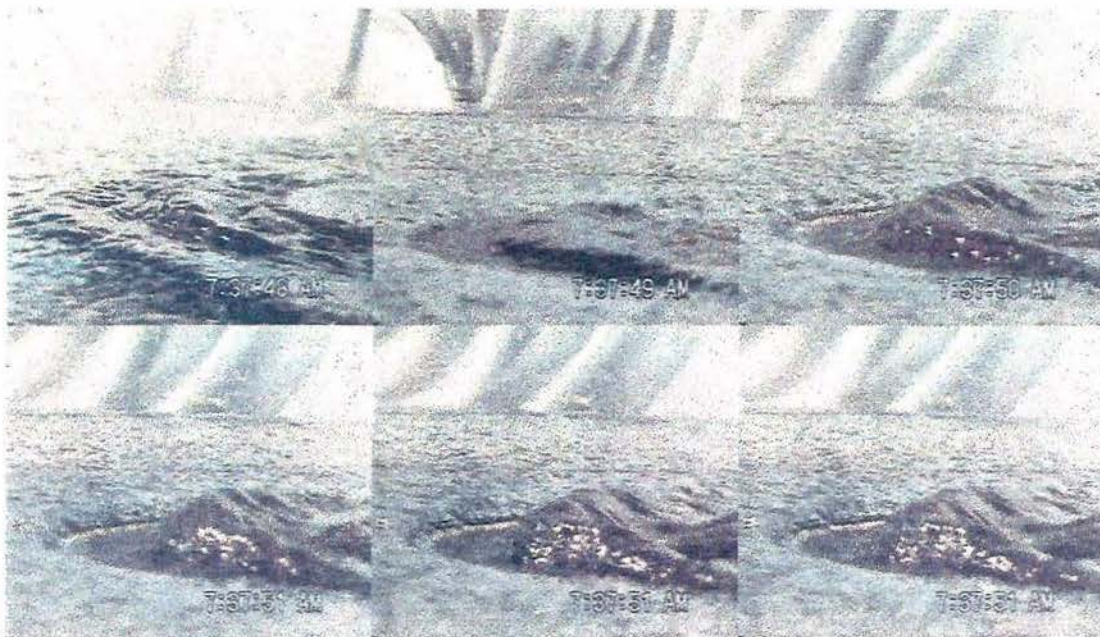


Figura 5.7 Seqüência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaios no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=16,0g s^{-1}$, $Q=0,0016m^3 s^{-1}$ e $I=0,03m m^{-1}$.

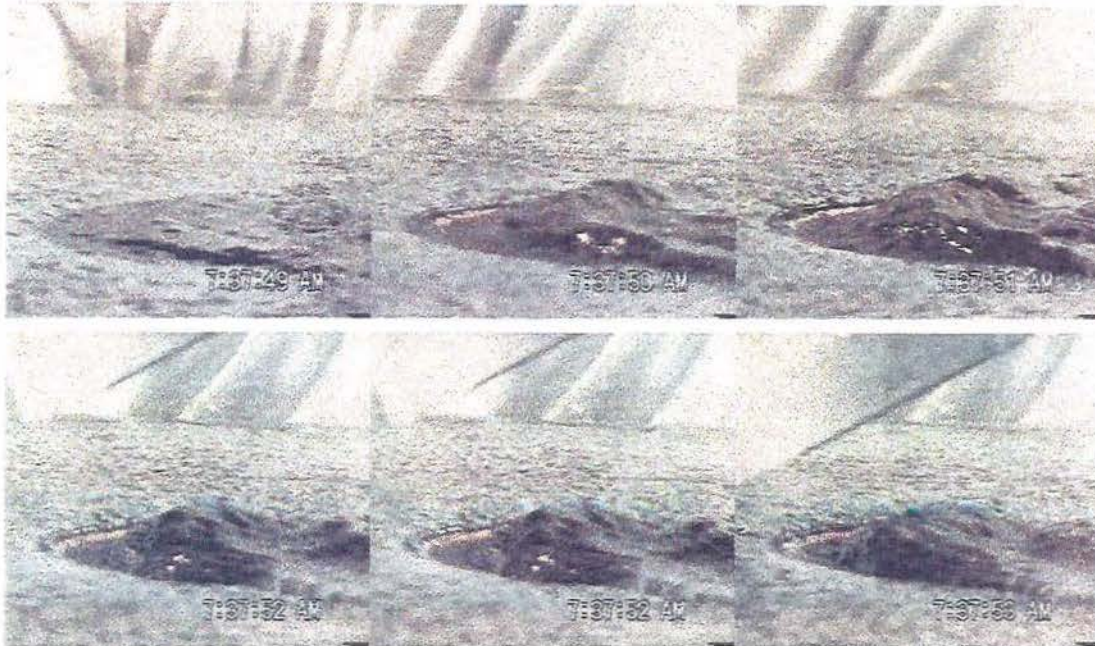


Figura 5.8 Sequência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaio no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=26,1\text{g s}^{-1}$, $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$.

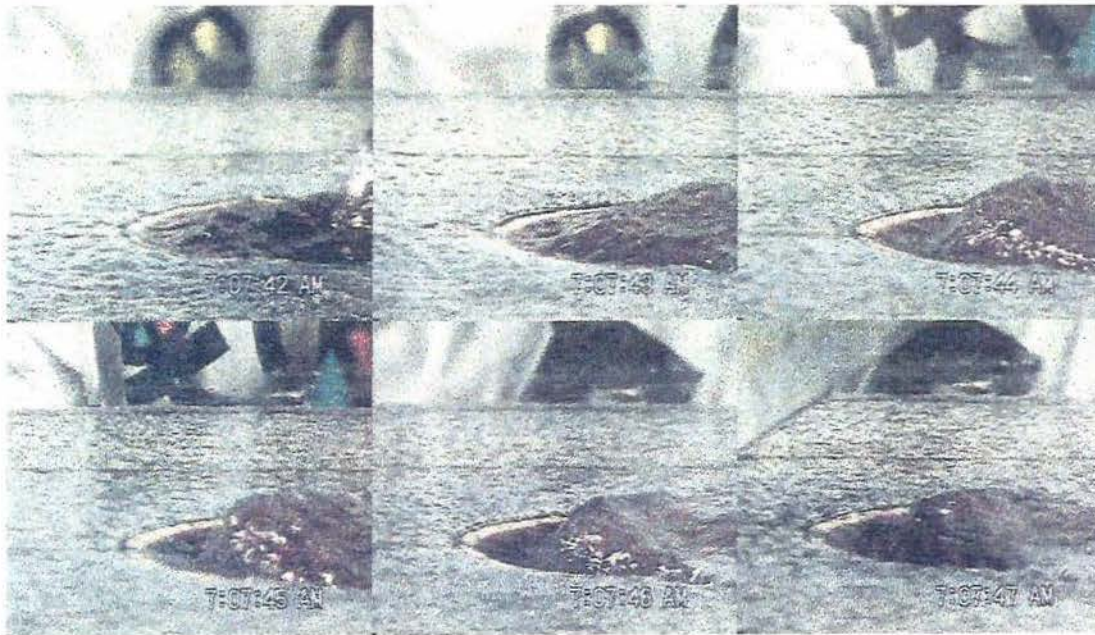


Figura 5.9 Sequência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaios no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=35,3\text{g s}^{-1}$, $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$.

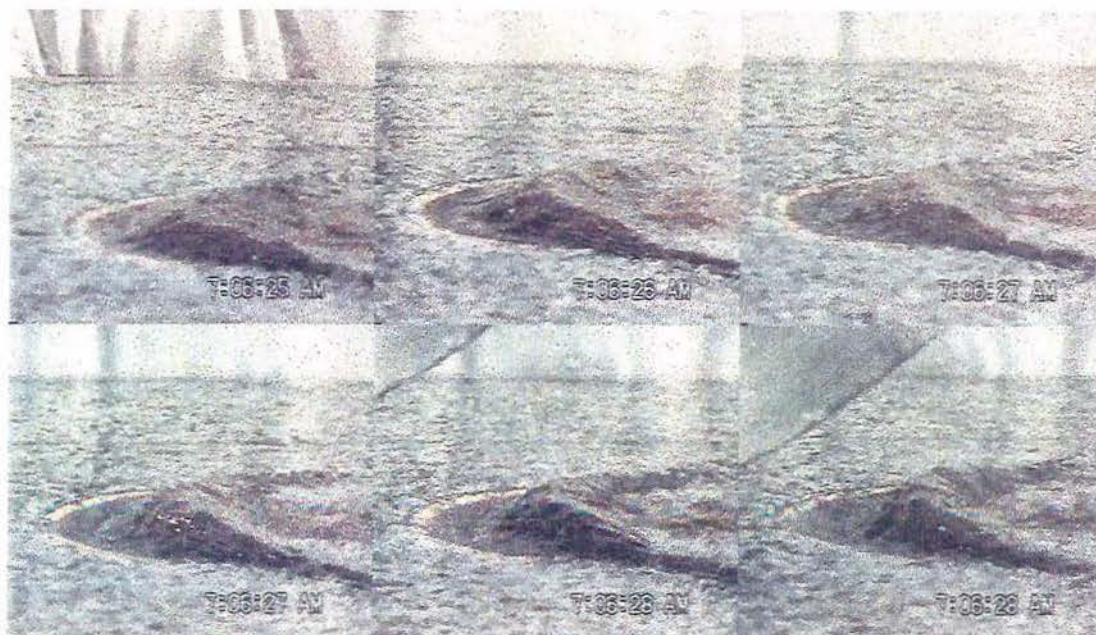


Figura 5.10 Seqüência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaios no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=47,2\text{g s}^{-1}$, $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$.



Figura 5.11 Seqüência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaio no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=61,1\text{g s}^{-1}$, $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$.

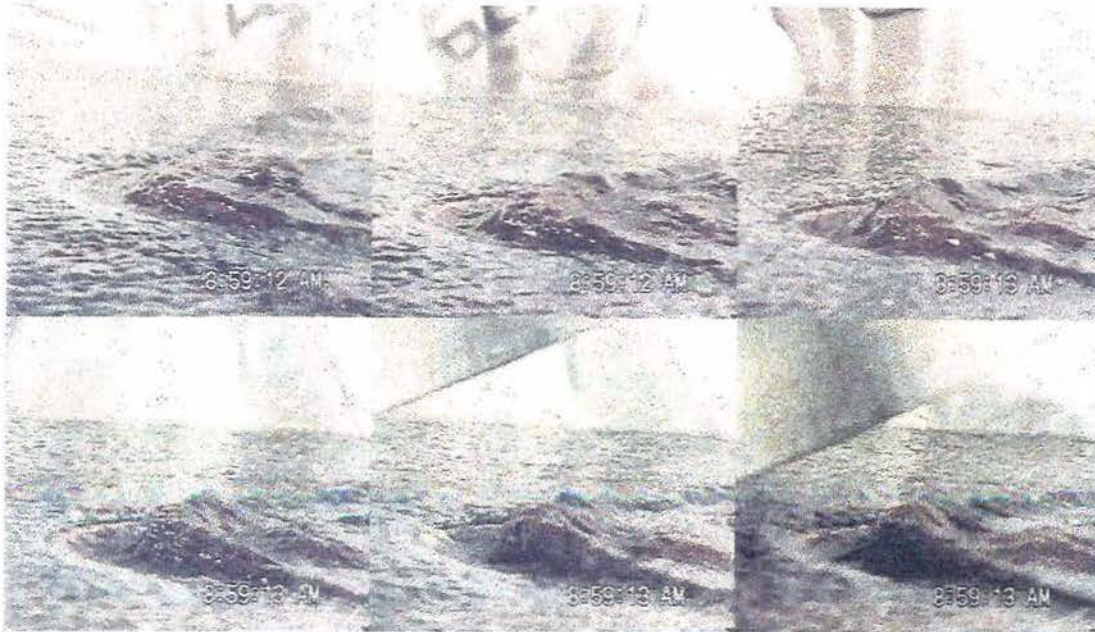


Figura 5.12 Sequência de imagens mostrando a deformação da linha de água sobre a região de ensaios no instante em que o escoamento incide sobre o cilindro para $q_s=75,5g\ s^{-1}$, $Q=0,0016m^3\ s^{-1}$ e $I=0,03m\ m^{-1}$.

A morfologia das amostras antes (a) e depois (b) da incidência do escoamento sobre as amostras contidas no cilindro para as diferentes taxas de adição de sedimentos podem ser observadas nas Figuras 5.13 a 5.20. Nota-se que as deformações seguem padrões distintos para adições de sedimentos entre $0g\ s^{-1}$ a $35,3g\ s^{-1}$ e entre $47,2g\ s^{-1}$ e $75,3g\ s^{-1}$. Para adições entre $0g\ s^{-1}$ a $35,3g\ s^{-1}$ (Figuras 5.13b, 5.14b, 5.15b, 5.16b e 5.17b), verifica-se a formação de uma fossa localizada à montante, enquanto que, à jusante dessa, verifica-se que o escoamento deformou o contorno sólido moldando uma superfície em declive. Para adições superiores a $35,3g\ s^{-1}$, as Figuras 5.18, 5.19 e 5.20 mostram um outro padrão de deformação, no qual não se verifica a formação da fossa nem a superfície em declive à jusante da fossa. Outro aspecto interessante observado é que, embora as taxas de desagregação de solo para adições de sedimentos superiores a $16g\ s^{-1}$ apresentem valores similares (Tabela 5.17), a morfologia das amostras mostra uma tendência de redução de tamanho da fossa. A redução do tamanho da fossa provocada pelo efeito da presença de sedimentos em trânsito no escoamento teria implicações na formação dos sulcos, uma vez que a formação das fossas é um dos fatores que possibilitam a formação dos sulcos, segundo Moss et al. (1982). Esse efeito será melhor caracterizado no segundo experimento, onde foi observado que a supressão da formação da fossa pela adição de sedimentos reduziu a formação e o desenvolvimento do sulco.

Os mecanismos de supressão da desagregação, causados pelo efeito de depósito ou trânsito de sedimentos sobre a amostra que foram observados neste experimento estão de acordo com a concepção teórica do modelo de predição de erosão proposto por Hairsine e Rose (1992), porém não foi possível encontrar na literatura nenhum trabalho que comprovasse a suposição teórica desse modelo. Por outro lado, os dados experimentais desse trabalho mostram que este efeito é relevante e que necessita ser levado em consideração nos modelos físicos de predição de erosão.

Outro aspecto a ser considerado é que, embora os resultados experimentais tenham mostrado que o mecanismo supressor da desagregação tenha sido causado pelo efeito de proteção da superfície do solo, não existem evidências que invalidem o conceito teórico de que a supressão das forças erosivas também possa ocorrer devido à utilização de parte da energia do escoamento para o transporte de sedimentos e para vencer a resistência do solo em detrimento da desagregação do solo. Deve-se, também considerar que, como mostrado no item 5.12, a adição de sedimentos aumenta a resistência ao escoamento e, conseqüentemente, sua dissipação de energia sendo provável que haja menos energia do escoamento disponível para provocar a desagregação. Com o procedimento experimental adotado, não foi possível verificar esse efeito porque a formação das correntes secundárias dentro da amostra criaram condições hidrodinâmicas diferenciadas dentro e fora do cilindro.

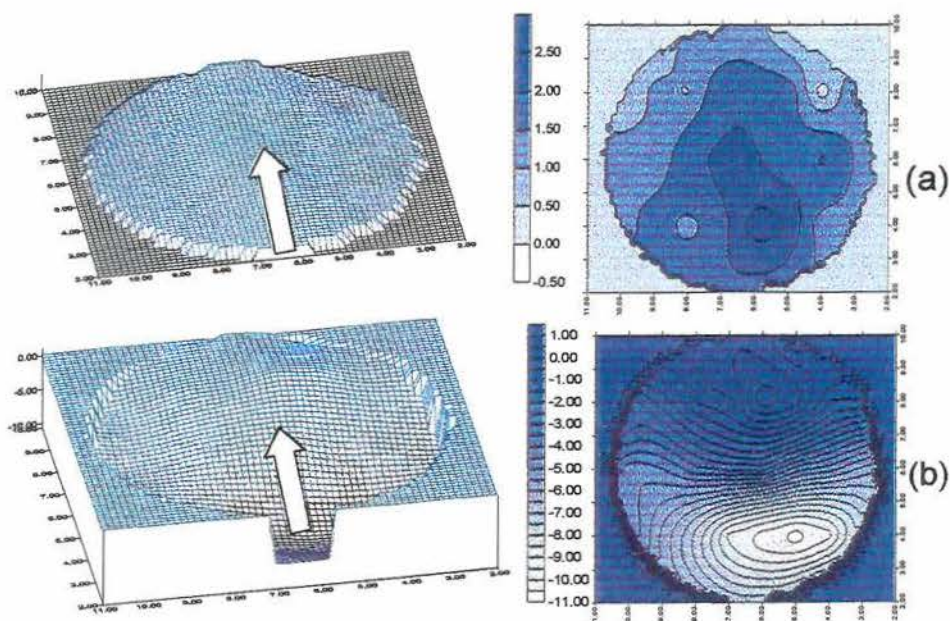


Figura 5.13 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, $q_s=0\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento.

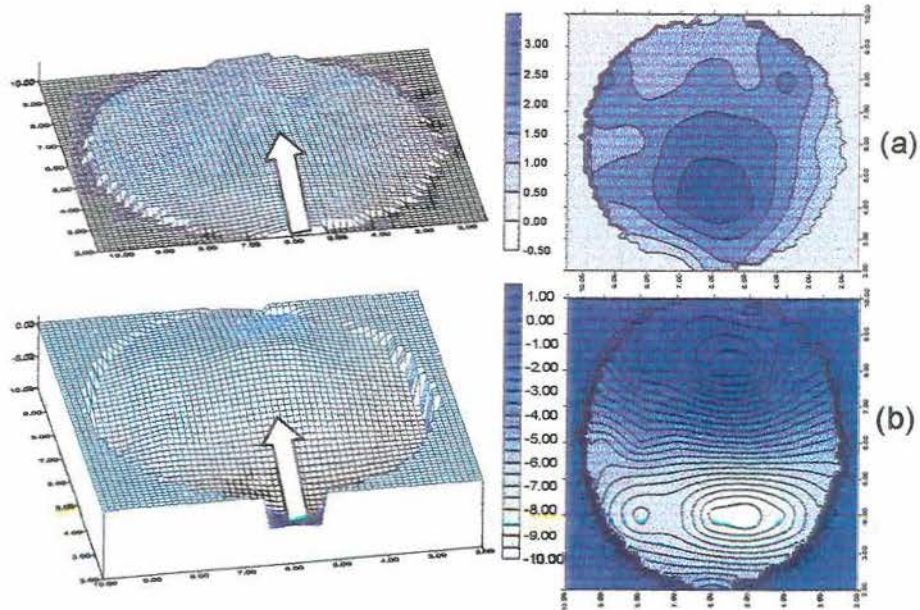


Figura 5.14 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, $q_s=10,4\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento.

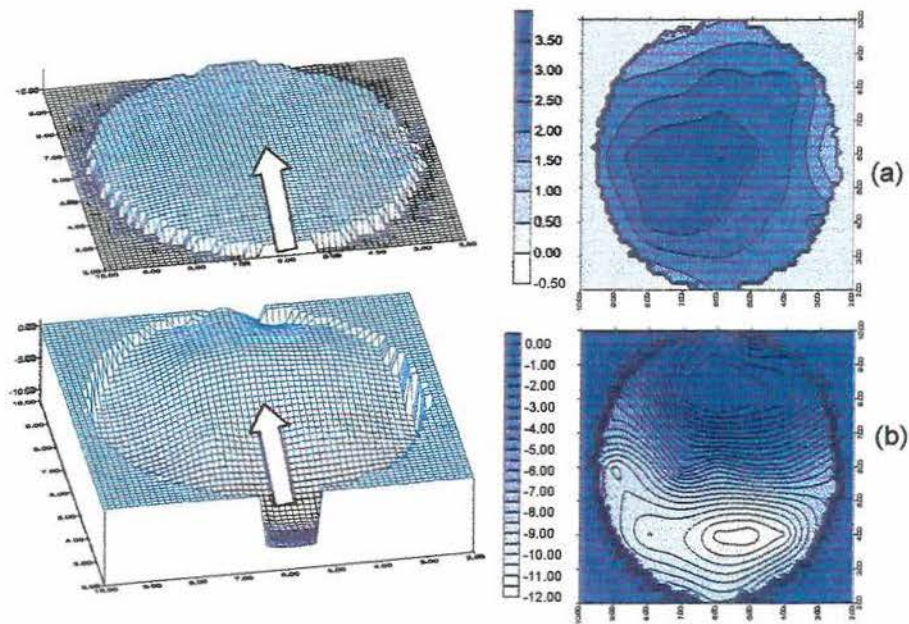


Figura 5.15 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, $q_s=16\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento.

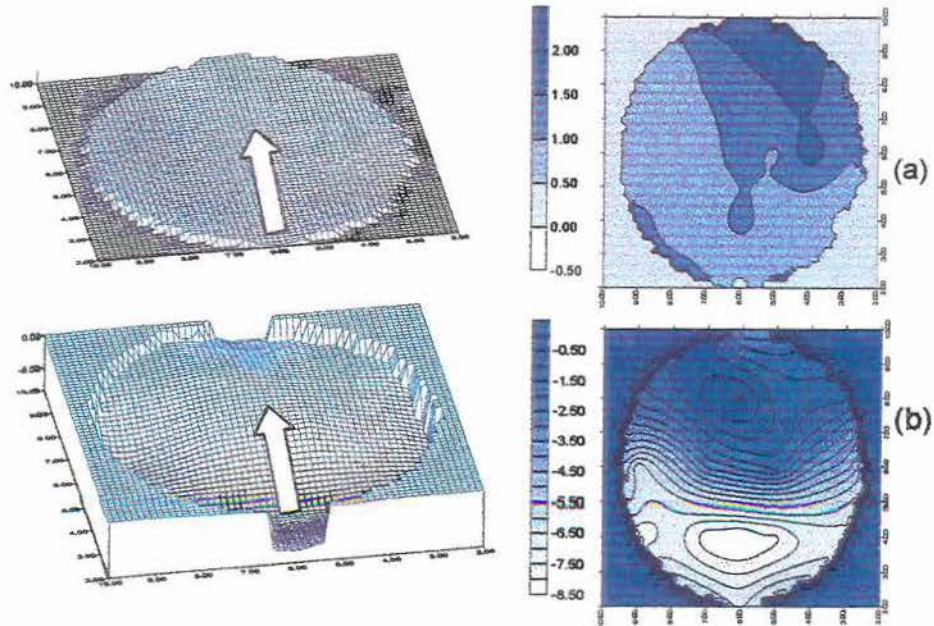


Figura 5.16 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, $q_s=26,1\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento.

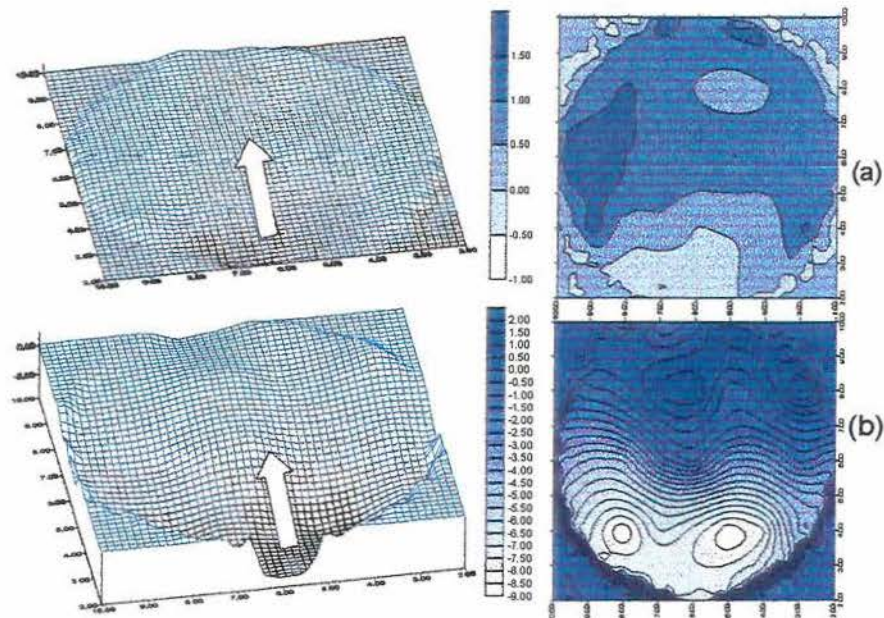


Figura 5.17 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, $q_s=35,3\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento.

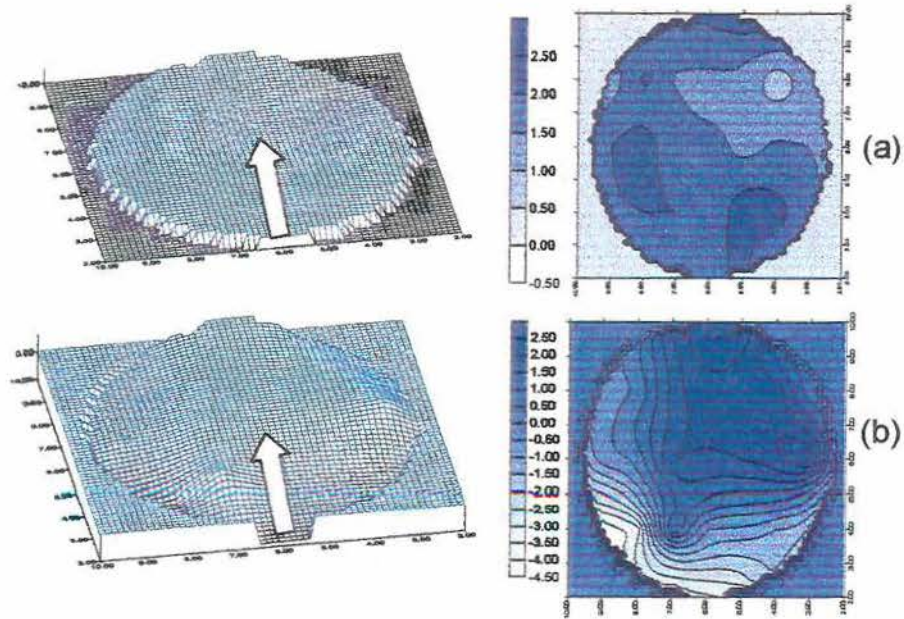


Figura 5.18 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, $q_s=47,2\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento.

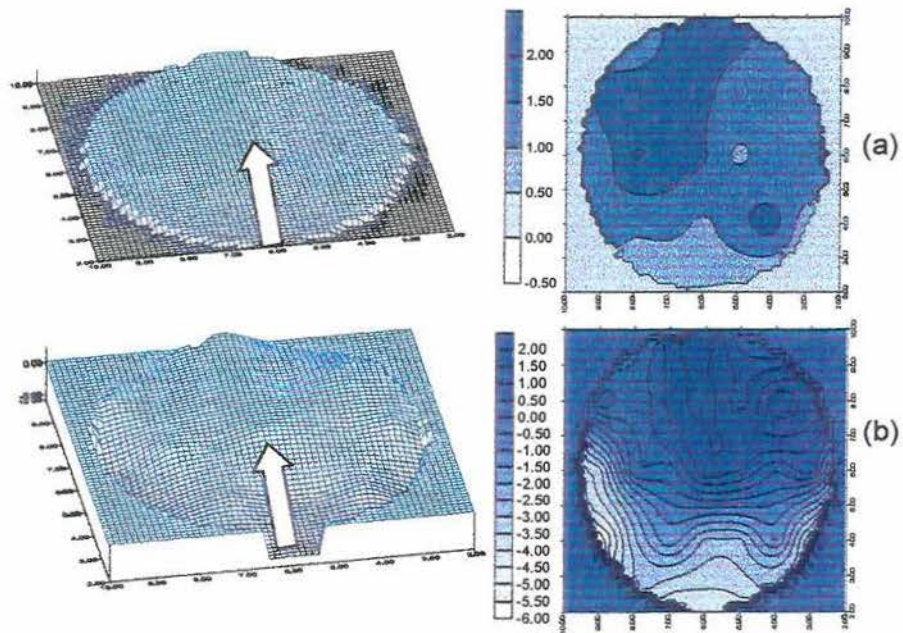


Figura 5.19 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, $q_s=61,1\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento.

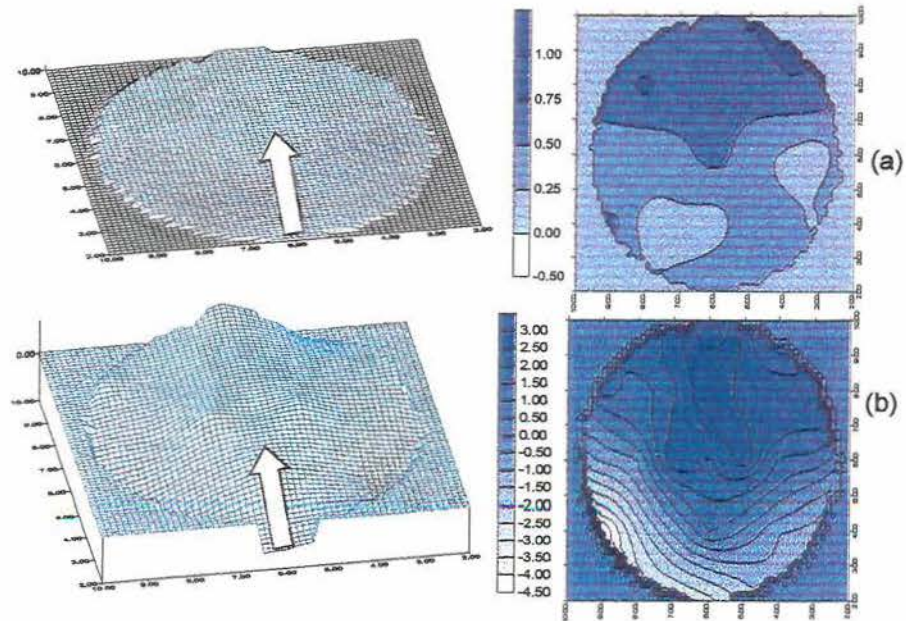


Figura 5.20 Descrição morfológica da deformação da amostra de solo contida no cilindro provocada pela ação do escoamento para uma condição de $Q=0,0016\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, $q_s=75,5\text{g s}^{-1}$ e $I=0,03\text{m m}^{-1}$ antes (a) e depois (b) da passagem do escoamento

5.2. Experimento 2: Distribuição espacial dos processos de desagregação do solo e deposição de sedimentos com a adição de sedimentos

Neste experimento, procurou-se superar parte das limitações encontradas no primeiro principalmente no que diz respeito ao volume de solo sujeito à ação do escoamento e com isto foi possível reproduzir em um canal de laboratório todas as fases do processo de erosão em sulco. Além deste aspecto, nesse experimento, procurou-se também avaliar os efeitos da distribuição espacial dos processos de desagregação de solo e de deposição de sedimentos a fim de verificar a consistência dos modelos de predição de erosão sugeridos por Foster e Meyer (1972a) e Hairsine e Rose (1992).

5.2.1. Avaliação do efeito da adição de sedimentos de granulometria extensa sobre os processos de desagregação de solo e de deposição de sedimentos

5.2.1.1. Condições experimentais, propriedades físicas da mistura água-sedimentos e características hidráulicas do escoamento

Na Tabela 5.8 são apresentadas as condições experimentais do ensaio enquanto que nas Tabelas 5.9 e 5.10 encontram-se descritas, respectivamente, as propriedades físicas da mistura de água-sedimento e as características hidráulicas utilizadas para caracterizar o escoamento, cujos valores representam um valor médio para três repetições.

Durante os ensaios, manteve-se um regime de escoamento permanente e uniforme. A ocorrência de variação nas vazões de saída entre as repetições (Tabela 5.8) deve-se, provavelmente, ao efeito da desuniformidade da saturação inicial do solo, a qual pode ter afetado a taxa de infiltração da água durante os ensaios, ainda que se tenha procurado uniformizar os procedimentos de umedecimento prévio do solo. A duração de cada ensaio também apresentou pequenas variações em função de dificuldades operacionais.

Pela Tabela 5.9 verifica-se que a adição de sedimentos provocou, com exceção da porosidade, um aumento nos valores das propriedades físicas quando comparados com a água clara. Observa-se, também, que a concentração de sedimentos apresentou valores elevados, porém encontram-se abaixo do limite definido como escoamento hiperconcentrado: $C_v=0,05$, (segundo Julien, 1995), mantendo o fluido seu comportamento Newtoniano.

Tabela 5.8 Condições experimentais utilizadas para adições de sedimentos com granulometria extensa.

q_b $g\ s^{-1}$	Repetições	I $m\ m^{-1}$	$Q_{entrada}$ $m^3\ s^{-1}$	Q_{saida} $m^3\ s^{-1}$	Tempo total s	Tempo $Q_{constante}$ s	T^0 $^{\circ}C$
0	1	0,05	0,000122	0,000084	245,2	206,0	20
0	2	0,05	0,000122	0,000083	187,6	150,5	20
0	3	0,05	0,000122	0,000091	233,4	191,0	20
2,03	1	0,05	0,000122	0,000090	233,3	200,0	20
2,03	2	0,05	0,000122	0,000090	230,6	200,0	20
2,03	3	0,05	0,000122	0,000089	229,0	190,0	20
3,81	1	0,05	0,000122	0,000085	230,7	206,0	20
3,81	2	0,05	0,000122	0,000088	226,0	195,0	20
3,81	3	0,05	0,000122	0,000089	230,7	195,0	20
6,13	1	0,05	0,000122	0,000074	244,3	197,6	20
6,13	2	0,05	0,000122	0,000087	232,4	184,7	20
6,13	3	0,05	0,000122	0,000084	227,1	181,0	20
7,49	1	0,05	0,000122	0,000073	242,9	198,7	20
7,49	2	0,05	0,000122	0,000083	249,4	198,8	20
7,49	3	0,05	0,000122	0,000084	233,7	186,1	20

Tabela 5.9 Propriedades físicas da mistura de água-sedimento para condição de adições de sedimentos com granulometria extensa e temperatura de 20°C (valores representam uma média de três repetições).

q_b $g\ s^{-1}$	γ_m $N\ m^{-3}$	P_0 $m^3\ m^{-3}$	μ_m $N\ s\ m^{-2}$	v_m $m^2\ s^{-1}$	ρ_m $kg\ m^{-3}$	C_v
0	10237,3	0,973	0,001067	0,00000102	1042,2	0,0268
2,03	10245,1	0,973	0,001068	0,00000102	1043,0	0,0272
3,81	10292,4	0,970	0,001075	0,00000103	1047,7	0,0301
6,13	10329,2	0,968	0,001081	0,00000103	1051,3	0,0323
7,49	10311,4	0,969	0,001078	0,00000103	1048,5	0,0312

Tabela 5.10 Características hidráulicas do escoamento para mistura de água-sedimentos para condição de adição de sedimentos com granulometria extensa e temperatura de 20 °C (valores representam uma média de três repetições).

q_b $g\ s^{-1}$	I $m\ m^{-1}$	v $m\ s^{-1}$	h m	τ $N\ m^{-2}$	u* $m\ s^{-1}$	Ω $kg\ s^{-3}$	ω $m\ s^{-1}$	Re	Fr
0	0,05	0,22	0,0039	2,00	0,044	0,44	0,011	840,1	1,12
2,03	0,05	0,23	0,0041	2,08	0,044	0,46	0,011	875,6	1,16
3,81	0,05	0,24	0,0036	1,87	0,042	0,45	0,012	851,0	1,30
6,13	0,05	0,23	0,0035	1,83	0,042	0,42	0,012	794,5	1,23
7,49	0,05	0,22	0,0036	1,85	0,042	0,42	0,011	778,8	1,19

As características hidráulicas do escoamento que constam Tabela 5.10 foram determinadas com base na velocidade do escoamento e nas propriedades físicas da mistura água-sedimento, utilizando-se as seguintes relações:

$$\tau = \gamma_m hI \quad 5.6$$

onde: γ_m é o peso específico da mistura (N m^{-3}) definido como $\gamma_m = \gamma(G(1-p_0) + p_0)$, G é a densidade (adimensional) definido por $\frac{\gamma_s}{\gamma}$, p_0 é a porosidade definida como $\frac{\nabla_v}{\nabla_t}$, ∇_v é o volume de vazios, ∇_t é o volume total (partículas sólidas mais volume de vazios)

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_m}} \quad 5.7$$

onde u_* é a velocidade de cisalhamento da mistura (m s^{-1}), ρ_m é a massa específica da mistura (kg m^{-3}), definida como $\rho_m = \rho_s(1-p_0) + \rho p_0$, ρ_s é a massa específica das partículas sólidas (kg m^{-3}), ρ é a massa específica da água (kg m^{-3}).

$$\Omega = \rho_m gIq \quad 5.8$$

onde Ω é a potência do escoamento (kg s^{-3}), g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}).

$$\omega = vI \quad 5.9$$

$$\text{Re} = \frac{vh}{\nu_m} \quad 5.10$$

onde ν_m é a viscosidade cinemática da mistura ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), definida como $\frac{\mu_m}{\rho_m}$, μ_m é a viscosidade dinâmica da mistura (N s m^{-2}), $\mu_m = \mu(1 + 2,5C_v)$, μ é a viscosidade dinâmica (N s m^{-2}), C_v é a concentração volumétrica de sedimentos (adimensional) definido como $\frac{\nabla_s}{\nabla_t}$.

O regime hidráulico do escoamento foi super-crítico de transição e nenhuma das características hidráulicas avaliadas mostrou diferença estatística significativa entre os tratamentos (Tabela 5.10). No caso da velocidade, observou-se uma tendência de aumento dessa variável até a adição de $3,81 \text{g s}^{-1}$ de sedimentos e, a partir desse valor, verificou-se uma redução da velocidade. É possível que o aumento da velocidade até uma determinada taxa de adição deva-se à menor resistência de forma, devido às menores deformações ocorridas no fundo do canal em função das adições crescentes dos sedimentos. Porém, a partir de um determinado limite, onde a deposição passa a ser maior que a desagregação (adições acima de $3,81 \text{g s}^{-1}$), a alta concentração de sedimento, sobretudo a parcela sendo transportada em

arraste, poderia estar provocando uma redução da velocidade do escoamento conforme já observado no experimento 1.

5.2.1.2. Descrição das deformações da amostra de solo após o ensaio

Ao final de cada ensaio foi feita uma descrição das deformações do solo provocadas pelo escoamento. Em todos os tratamentos, observou-se uma condição muito semelhante de deformação do solo, podendo-se identificar três zonas distintas:

a) Zona de desagregação à montante - no trecho inicial do canal, o processo de desagregação predominou sobre o de deposição, onde, logo no início do contato do escoamento com o solo, formava-se uma fossa transversal, como produto da aceleração/desaceleração da mistura água-sedimento. O tamanho da fossa variou conforme o grau de adição de sedimentos, sendo tanto menor quanto maior o volume de sedimentos adicionados. A partir dessa fossa, o escoamento concentrava-se e evoluía para um processo de incisão no solo, formando um sulco de aproximadamente 0,01m-0,015m de profundidade e 0,03m-0,04m de largura. O comprimento do sulco variou em função do grau de adição de sedimentos, ou seja, maiores adições de sedimento resultaram em sulcos mais curtos. A morfologia do sulco, para estas condições, mostrava uma incisão mais profunda (sulco estreito e profundo) em seu trecho inicial e, à medida que o sulco progredia, tornava-se mais largo e pouco profundo até desaparecer por completo. Para o tratamento onde não houve adição de sedimento, o comprimento do sulco foi de aproximadamente 1,65m.

b) Zona de deposição - nesse trecho predominou o processo de deposição, ou seja, a incisão no solo não ocorreu de forma contínua como no trecho inicial, ainda que, em alguns locais dessa zona, tenha ocorrido a desagregação com incisão do solo.

c) Zona de desagregação à jusante - no final do canal, o processo de desagregação predominou sobre o de deposição com ocorrência de incisão no solo de forma contínua. É provável que essa condição tenha ocorrido em decorrência da sobre-elevação do leito à montante causada pelo depósito contínuo de sedimentos e também pelo efeito de rebaixamento da linha d'água do escoamento final do canal.

5.2.1.3. Efeito da adição de sedimentos sobre a desagregação do solo e a deposição de sedimentos

Na Tabela 5.11 são apresentados os valores referentes aos efeitos da adição de sedimentos sobre a descarga sólida, a concentração de sedimentos no escoamento, a desagregação e a deposição total. A análise de variância realizada entre os tratamentos para as variáveis apresentadas na Tabela 5.11 indicou existir diferenças a 5% de significância para a concentração de sedimentos, e a 1% para a desagregação, a deposição total e a distância para início do depósito. As demais variáveis, que constam na Tabela 5.11 não apresentaram diferença significativa entre tratamentos. Em relação à descarga sólida de saída, no entanto, verifica-se que os valores médios variam dentro de uma faixa correspondente a $5,72\text{g s}^{-1}$ a $6,44\text{g s}^{-1}$, evidenciando com isto a hipótese de que a descarga sólida está limitada a uma determinada capacidade de transporte

Em relação às quantidades de solo desagregado e depositado, apresentados na Tabela 5.11, verifica-se que para as adições de até $3,81\text{g s}^{-1}$ a desagregação total foi maior que a deposição total e que para adições superiores a $3,81\text{g s}^{-1}$ a situação se inverteu, indicando que as adições de sedimentos foram superiores à capacidade de transporte do escoamento. Por outro lado, é necessário considerar que parte do material depositado ao longo do canal foi depositado durante o tempo de recessão do escoamento. Dessa forma, se considerarmos um tempo médio de recessão do escoamento (o tempo total menos o tempo no qual a vazão permaneceu constante da Tabela 5.8) e admitirmos que durante esse tempo 100% da descarga sólida foi depositada no canal, podemos estimar um valor médio aproximado de 245g de sedimentos depositados durante a recessão do escoamento.

Tabela 5.11 Efeito da adição de sedimentos com granulometria extensa sobre a desagregação, a deposição total, o comprimento necessário para início de deposição dos sedimentos ($Q_{entrada}=0,000122\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

q_s g s^{-1}	Repetições	q_s saída g s^{-1}	C_{g1} g l^{-1}	Desagregação total g	Deposição total g	Comprimento para deposição m
0	1	5,12	60,72	1541,7	366,0	2,06
0	2	6,02	72,25	1465,4	438,6	2,66
0	3	6,02	65,72	1480,2	376,2	1,82
	média	5,72	66,23	1495,8	393,6	2,18
2,04	1	5,99	66,63	1221,9	520,4	2,70
2,04	2	6,11	68,09	1256,2	235,8	2,10
2,04	3	6,01	67,20	1265,5	480,3	1,98
	média	6,04	67,31	1247,9	412,2	2,26
3,81	1	6,23	73,34	934,6	520,6	1,90
3,81	2	6,57	74,70	790,7	651,8	1,86
3,81	3	6,52	73,46	854,3	627,9	1,62
	média	6,44	73,83	859,9	600,1	1,79
6,13	1	5,85	79,41	577,0	645,2	1,82
6,13	2	6,93	79,95	764,8	678,0	1,86
6,13	3	6,52	77,22	453,8	664,1	1,78
	média	6,43	78,86	598,5	662,4	1,82
7,49	1	4,99	69,20	277,6	1019,6	1,22
7,49	2	7,22	86,73	324,4	792,4	1,50
7,49	3	6,12	73,12	237,4	1022,9	0,54
	média	6,11	76,35	279,8	945,0	1,09

Para as variáveis onde a análise de variância mostrou diferenças significativas, foram ajustados modelos de regressão, sendo que o modelo linear foi aquele que mostrou maior grau de significância estatística. Pela análise das Figuras 5.21 a 5.24 nota-se que a adição crescente de sedimentos resultou: a) em aumento da concentração de sedimentos no escoamento; b) em menores quantidades de solo desagregado; c) em maiores quantidades de sedimentos depositados; d) em redução do comprimento onde se inicia a deposição (taxas de desagregação negativa).

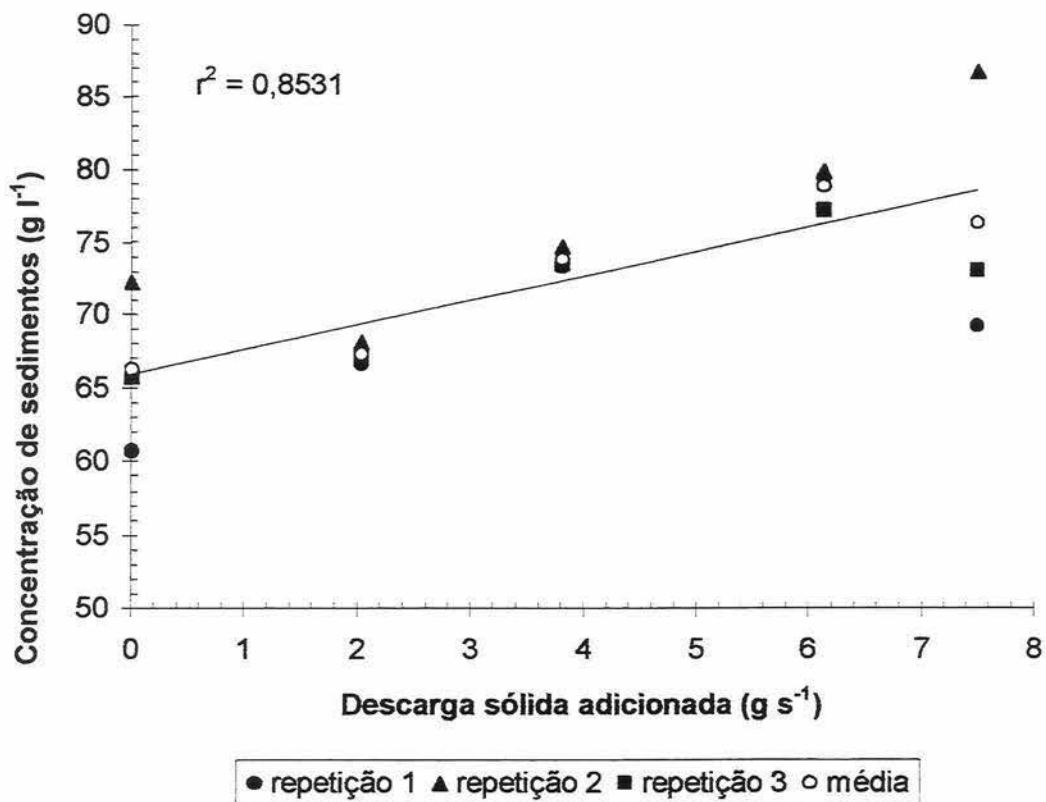


Figura 5.21 Efeito da adição de sedimento de granulometria extensa sobre a concentração de sedimentos (os diferentes pontos indicam as repetições realizadas).

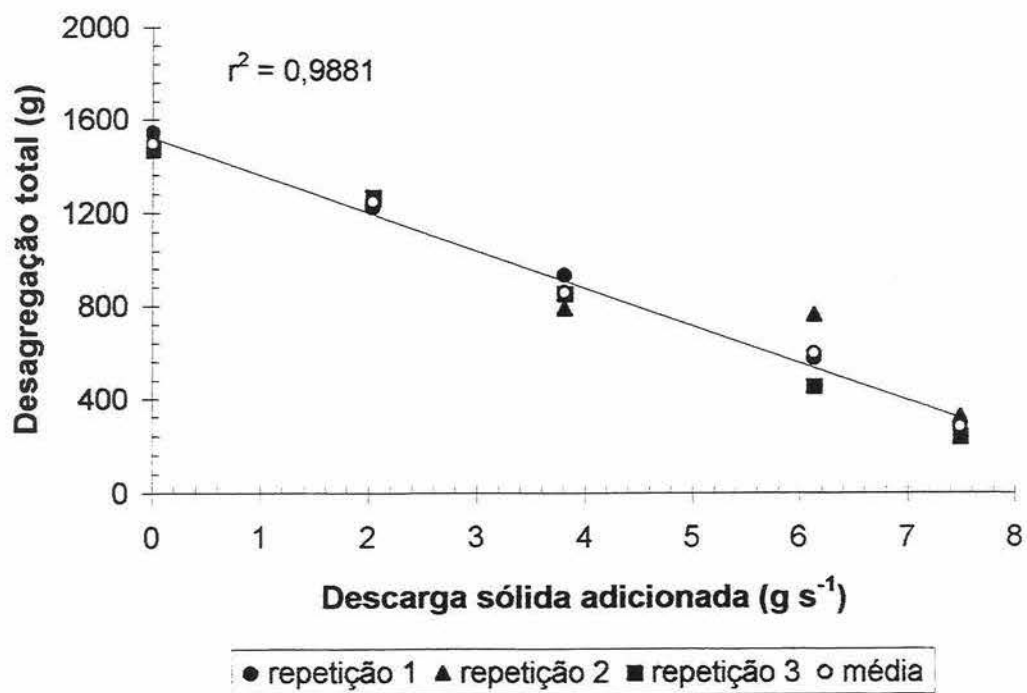


Figura 5.22 Efeito da adição de sedimentos de granulometria extensa sobre a desagregação total (os diferentes pontos indicam as repetições realizadas).

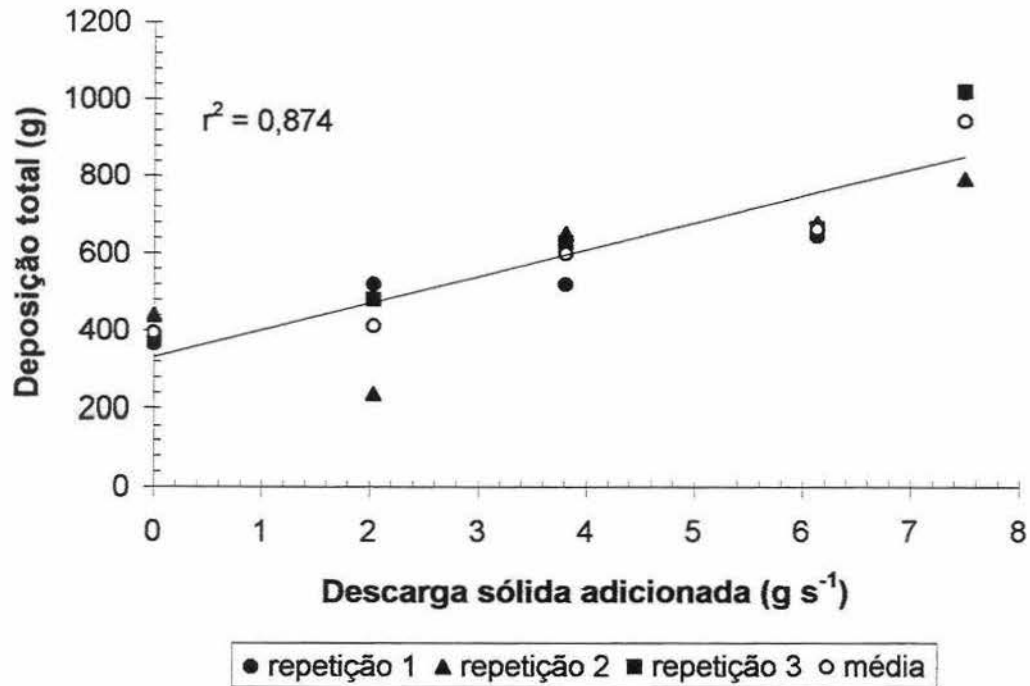


Figura 5.23 Efeito da adição de sedimentos de granulometria extensa sobre a deposição total (os diferentes pontos indicam as repetições realizadas).

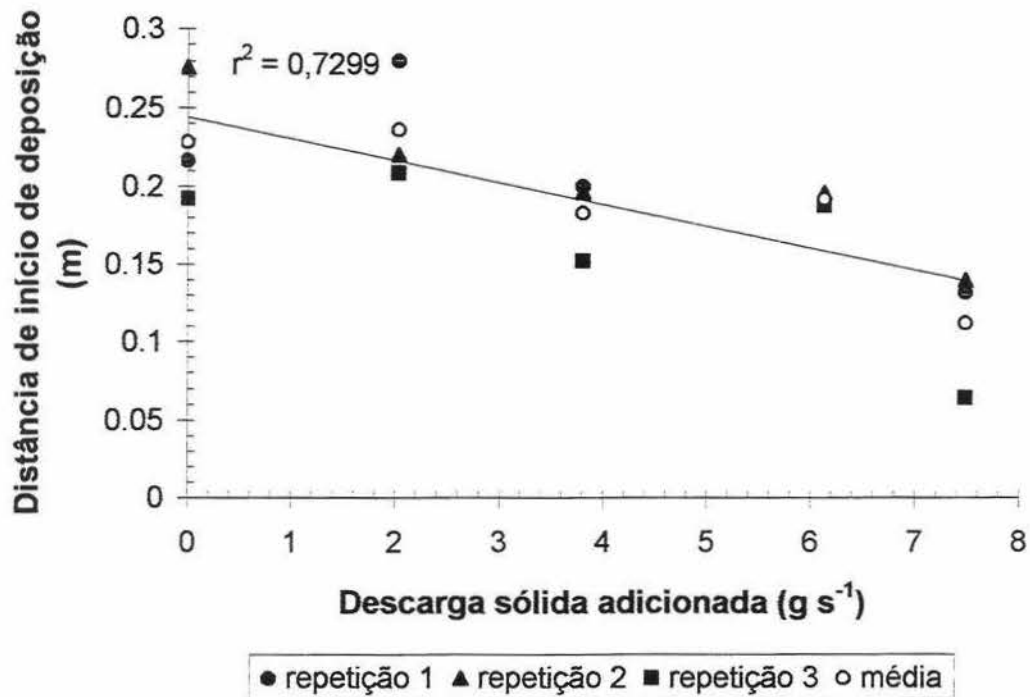


Figura 5.24 Efeito da adição de sedimentos de granulometria extensa sobre o comprimento para início de deposição (os diferentes pontos indicam as repetições realizadas).

Na Tabela 5.12 encontra-se os valores da granulometria do material transportado e do material de fundo. Uma vez que o material adicionado é de mesma natureza que o material de

fundo, assume-se que ambos possuem a mesma granulometria. A análise estatística realizada para verificar diferenças na granulometria do material transportado representado pelos fatores d_{10} , d_{50} e d_{90} para as diferentes taxas de adição de sedimentos, mostrou não haver diferenças significativas. Verificou-se apenas uma tendência de que para as maiores taxas de adição de sedimentos, houve uma redução do tamanho dos sedimentos mais finos, representado pelo fator d_{10} . Por outro lado, comparando-se a granulometria do material transportado com a granulometria do material de fundo verifica-se que ocorreu uma seletividade do material transportado. Para os materiais transportados mais finos representado pelo fator d_{10} o escoamento transportou materiais com tamanho menor que aqueles que compunham o fundo enquanto que para os materiais transportados de granulometria maior (representados pelos fatores d_{50} e d_{90}) ocorreu o contrário uma vez que o escoamento transportou sedimentos maiores que aqueles que compunham o fundo.

Tabela 5.12 Granulometria dos sedimentos do material coletado e de fundo (valores representam uma média de três repetições).

q_s $g\ s^{-1}$	d_{10} mm	d_{50} mm	d_{90} mm
0	0,15	1,28	2,04
2,04	0,13	1,38	2,04
3,81	0,11	1,09	1,99
6,13	0,13	1,20	2,04
7,49	0,08	1,15	2,00
Fundo ⁽¹⁾	0,17	0,65	1,83
Fundo ⁽²⁾	0,18	0,77	1,83

⁽¹⁾ Obtido através do tamisamento úmido

⁽²⁾ Obtido através do tamisamento seco

5.2.1.4. Determinação da capacidade de transporte de sedimentos

A capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento foi determinada de duas maneiras: utilizando-se os dados experimentais e através do uso de equações de transporte de sedimentos. Na determinação da capacidade de transporte de sedimentos utilizando-se dados experimentais, foram adotados dois procedimentos.

No procedimento 1, a capacidade de transporte foi determinada observando o comportamento da desagregação e da deposição total em função da adição de sedimentos (Figura 5.25). Nota-se que existe um ponto onde as retas se cruzam, representando a condição

em que a quantidade de solo desagregado é igual à depositada. Em outras palavras, nessa situação, a descarga de abastecimento (taxa de adição) é igual à capacidade de transporte do escoamento, pois nela encontramos o equilíbrio entre a desagregação e a deposição. Dessa forma, o ponto de interseção das retas poderia representar uma “capacidade de transporte”.

Calculando-se o ponto de interseção entre as duas retas, obteve-se um valor de $5,20\text{g s}^{-1}$ com um coeficiente de variação de $1,67\text{g s}^{-1}$, o que corresponderia a um valor variando entre $3,53\text{g s}^{-1}$ a $6,87\text{g s}^{-1}$. Sabe-se, no entanto, que a capacidade de transporte do escoamento não é constante para todos os segmentos do canal, mas sim que varia no tempo e no espaço conforme a deformação do contorno sólido (Lei et al., 1998). Portanto, o valor de $5,2\text{g s}^{-1}$ corresponderia a um valor médio da capacidade de transporte, enquanto que a variação calculada poderia representar os valores “extremos” dessa capacidade de transporte.

O segundo procedimento utilizado para determinar a capacidade de transporte baseou-se na utilização da Figura 5.26, a qual relaciona a descarga sólida adicionada com a descarga sólida coletada. Por inspeção dessa Figura, verifica-se que os pontos que representam a descarga sólida têm uma tendência de elevação com as adições de sedimento para valores entre 4g s^{-1} e 5g s^{-1} , enquanto que para valores maiores, a descarga sólida diminui. Dessa maneira, poderia ser considerado que a capacidade de transporte seria representada pelo valor máximo da descarga sólida coletada a qual assume um valor de $6,4\text{g s}^{-1}$.

A fim de comparar os valores obtidos pelos métodos experimentais com valores teóricos da capacidade de transporte foram utilizadas três equações de transporte de sedimentos: Yalin, definida pela equação 5.1; Nearing et al., definida pela equação 5.2; Yang, definida pela equação 5.3.

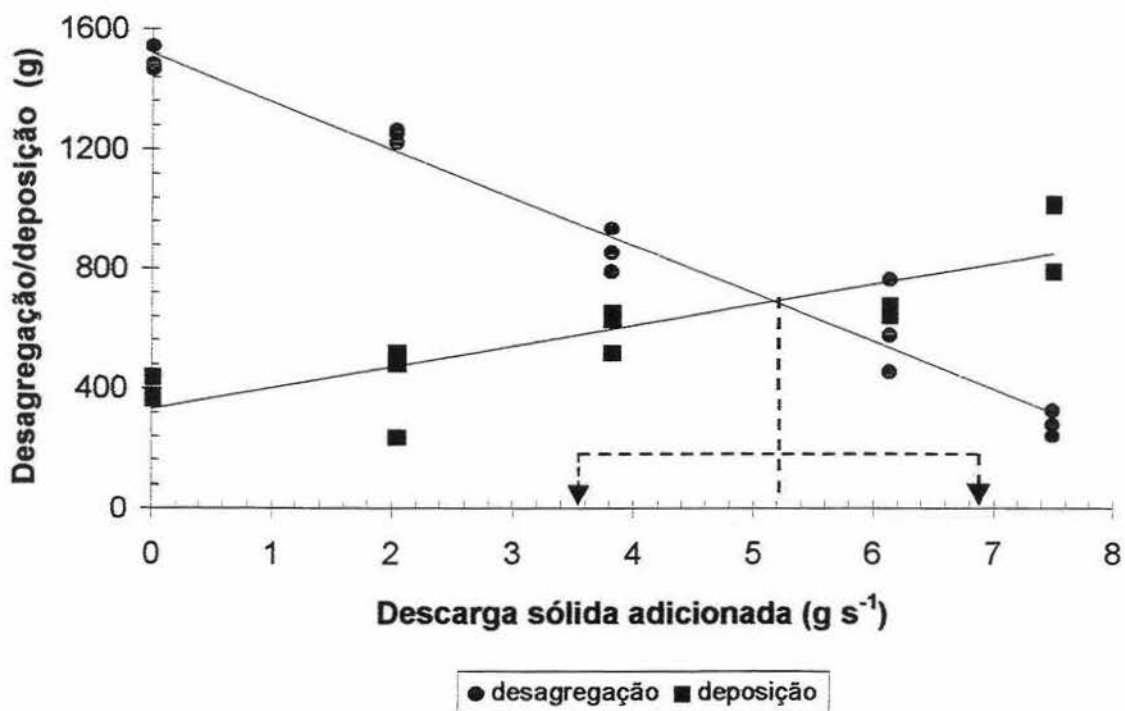


Figura 5.25 Efeito da adição de sedimentos de granulometria extensa sobre a desagregação e deposição total do solo.

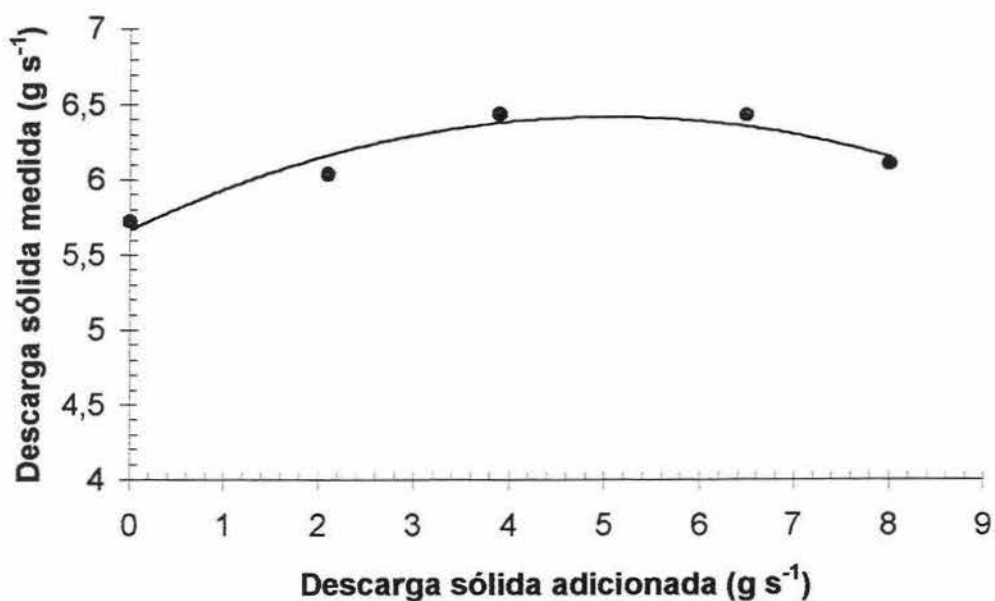


Figura 5.26 Efeito da adição de sedimentos de granulometria extensa sobre a descarga sólida medida (cada ponto representa uma média de três repetições).

Para aplicar a equação de Yalin, utilizou-se, como diâmetro da partícula, o valor 1220 μ m, o que corresponde ao d_{50} médio dos tratamentos. Para o uso da equação proposta por

Nearing et al., considerou-se a potência do escoamento calculada para condição de água sem sedimento uma vez que nesta condição o escoamento Newtoniano apresenta sua máxima capacidade de transporte. Assim, a capacidade de transporte estimada pelas equações de Yalin, Nearing et al., e Yang foram, respectivamente, $1,85\text{g s}^{-1}$, $1,83\text{g s}^{-1}$ e $1,78\text{g s}^{-1}$. Por esses resultados, verifica-se que a capacidade de transporte estimada apresentou uma diferença de 60% com a capacidade de transporte determinada experimentalmente pelo procedimento um e de 70% quando comparada com capacidade de transporte determinada experimentalmente pelo procedimento dois. As diferenças entre a capacidade de transporte estimada pelas equações e aquela determinada experimentalmente no experimento dois foram maiores do que aquelas encontradas no experimento um. Provavelmente, para o caso do experimento dois, a condição que explica esta situação está relacionada com as características hidráulicas utilizadas para o cálculo da capacidade de transporte, tais como altura, largura e velocidade do escoamento (Tabela 5.10), que representam um valor médio ao longo de todo trecho do canal, enquanto na realidade, essas características apresentaram uma variação espaço-temporal que não foi considerada. Por exemplo, logo no início do canal, onde formava-se o sulco, o escoamento era confinado e tanto a velocidade quanto a altura do escoamento eram maiores que nos trechos localizados no trecho médio do canal. Dessa forma, pode-se supor que a capacidade de transporte de sedimentos nesse seja maior do que em trechos onde o escoamento ocupa toda largura do canal. Ao considerar um valor médio das características hidráulicas (altura, largura e velocidade do escoamento), estamos desconsiderando a variabilidade de que na verdade estaria ocorrendo. Este aspecto será discutido no item 5.2.1.6. onde procurou-se estimar a variação espacial da descarga sólida ao longo do canal.

O fato das equações estarem subestimando a capacidade de transporte de sedimentos tem implicações na estimativa da desagregação por modelos de predição de erosão, os quais utilizam essa grandeza como referência para estimar a desagregação. Nesse caso se a capacidade de transporte for subestimada, a taxa de desagregação também a será.

5.2.1.5. Efeito da adição de sedimentos sobre a distribuição espacial das taxas de desagregação de solo e de deposição de sedimentos

Os efeitos da adição de sedimento sobre a distribuição espacial da taxas de desagregação e de deposição podem ser visualizados na Figura 5.27. Observa-se que a adição de sedimentos influenciou de forma bastante significativa a desagregação de solo e a

deposição de sedimentos, de tal forma que o aumento da adição de sedimento resultou em menores taxas de desagregação, maiores taxas de deposição e redução no comprimento do trecho onde tem início o que se denominou como “zona de deposição”. É necessário considerar, no entanto, que embora a Figura 5.27 mostre, ao longo do canal, a presença de zonas de desagregação e deposição, não significa que nesses trechos tenham ocorrido somente um dos processos. Na realidade, esses processos ocorreram de forma simultânea ao longo de todo canal, porém com predominância e intensidade diferente.

A distribuição espacial das taxas de desagregação e deposição (Figura 5.27) também mostra que, logo no início do canal, as taxas de desagregação são bastante elevadas porém, ao longo do canal, esta vai sendo reduzida até um ponto em que a descarga sólida supera a capacidade de transporte e passa a predominar a deposição (segmento onde as taxas assumem um valor negativo). No segmento final do canal (6,0m a 7,0m), ocorre novamente um aumento das taxas de desagregação em função da sobre-elevação do leito. Verifica-se, também, que à medida que aumenta a taxa de adição de sedimentos, essa dinâmica fica mais evidente, pois as taxas de desagregação são reduzidas e a transição da zona de desagregação para zona de depósito fica mais curta.

O padrão da erosão mostrado na Figura 5.27 é, em parte, consistente com os modelos de Foster e Meyer (1972a) e Hairsine e Rose (1992). De acordo com esses modelos, é previsto que a taxa de desagregação decresce exponencialmente em função da distância (Figura 3.2) e também que a taxa de desagregação é dependente da taxa de adição de sedimentos. Por outro lado, os modelos de Foster e Meyer (1972a) e Hairsine e Rose (1992) não são capazes de prever as zonas de deposição verificadas nos tratamentos onde as taxas de adição de sedimentos foram menores que a capacidade de transporte do escoamento (0g s^{-1} a $3,81\text{ g s}^{-1}$). Para os modelos de Foster e Meyer (1972a) e Hairsine e Rose (1992) em se tratando de um caso onde o declive é constante e não existe contribuição lateral de aporte de sedimentos, não é possível ocorrer deposição ao longo do trecho. Nesse caso, se poder-se ia afirmar que estaria faltando nesses modelos, elementos que possibilitem levar em consideração as interações entre a deformação do contorno sólido e as alterações das características hidráulicas do escoamento, as quais afetam os processos de desagregação e deposição do solo conforme proposto no modelo de Lei et al. (1998).

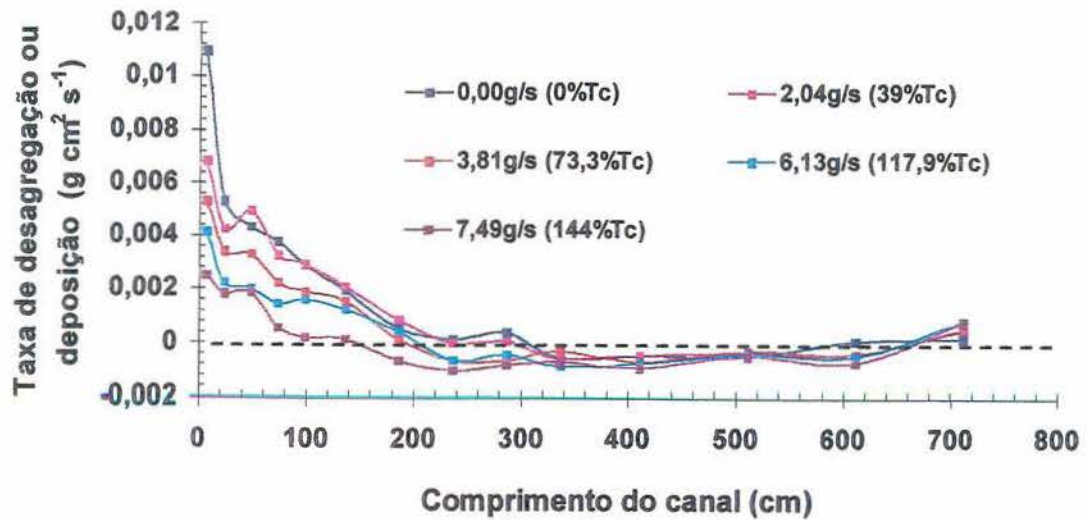


Figura 5.27 Efeito das adições de sedimento de granulometria extensa sobre a distribuição espacial das taxas de desagregação de solo e deposição de sedimentos.

5.2.1.6. Efeito da adição de sedimentos sobre a distribuição espacial da descarga sólida

Na Figura 5.28 está representado o efeito da adição de sedimentos sobre a variação espacial da descarga sólida ao longo do canal, estimada através do uso da equação 5.11.

$$DSE = \frac{\sum_{i=1}^n d_p}{t \cdot w} + q_s \tag{5.11}$$

onde: DSE é a descarga sólida estimada ($g\ s^{-1}$), d_p é a desagregação/deposição no segmento considerado (g), t é o tempo (s), w é a largura das caixas (cm), q_s é a descarga sólida injetada ($g\ s^{-1}$), i é o segmento do canal ($i=1,2,3...14$).

Pela Figura 5.28, observa-se que a DSE varia ao longo do canal, de forma que, no trecho inicial (0m a 2m), os valores de descarga apresentam um crescimento até um determinado limite. Logo a seguir, no trecho correspondente aos 4m do início do canal, a descarga sólida decresce até atingir uma condição de “equilíbrio”, onde provavelmente a descarga sólida se encontra próximo da capacidade de transporte ($5,2g\ s^{-1}$ conforme determinado pelo procedimento 1). Verifica-se, também, que os valores correspondentes às descargas máximas de sedimentos são superiores aos valores correspondentes à descarga sólida na condição de equilíbrio dinâmico, o que corresponderia dizer que, em alguns trechos, a descarga de sedimentos foi superior à capacidade de transporte média do escoamento.

Porém, é necessário levar em consideração que a capacidade de transporte do escoamento apresenta, também, uma variação espacial em função das deformações do contorno sólido, a qual influencia a altura do escoamento e, conseqüentemente, a capacidade de transporte (Lei et ali.,1998). Exemplificando, conforme já comentado, com a formação do sulco no início do canal, ocorreu um estreitamento da largura do escoamento e um aumento da altura da lâmina de água o que supostamente teria propiciado condições para um aumento localizado da tensão de cisalhamento do escoamento e, conseqüentemente, da capacidade de transporte.

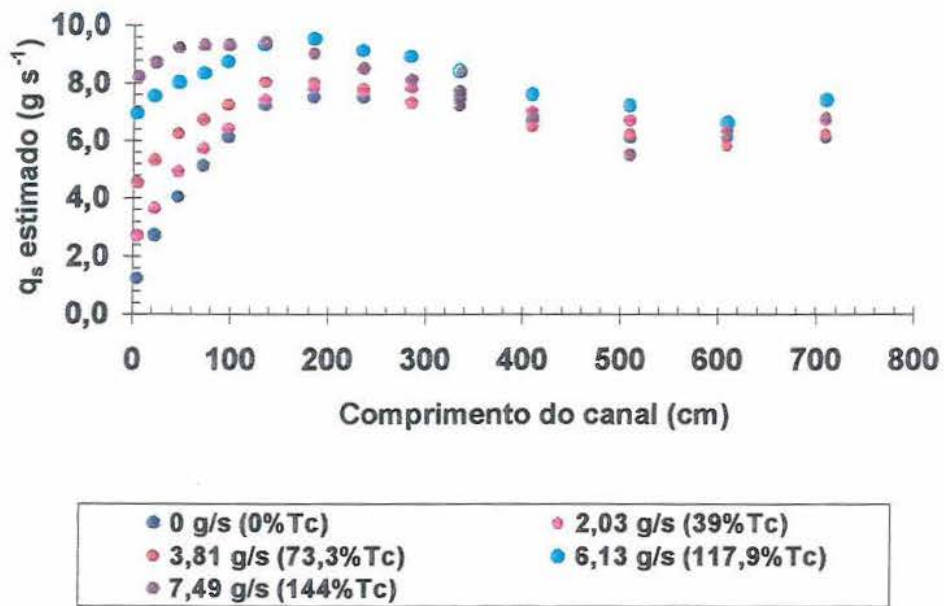


Figura 5.28 Descarga sólida estimada distribuída ao longo do canal para as diferentes taxas de adição de sedimentos para $Q=0,000122m^3 s^{-1}$, $I=0,05m m^{-1}$ e $T_c=5,2g s^{-1}$.

A comparação entre os valores da descarga sólida estimada a partir dos dados experimentais e os valores da descarga sólida estimada pelo modelo teórico proposto por Foster e Meyer (1972a), foi feita a partir de uma simulação matemática da relação utilizada no modelo WEPP (Nearing et al.,1989) para calcular a erosão em sulcos (equação 5.12):

$$q_s = (q_{so} - T_c)e^{-\alpha x} + T_c \quad (\text{equação válida para } q_{so} \leq T_c) \quad 5.12$$

onde q_{so} é a descarga sólida no trecho ($g s^{-1}$), α representa a relação entre $\frac{T_c}{D_c}$, e x é a distância ao longo do sulco. O valor de T_c considerado nesta simulação foi de $5,2g s^{-1}$ o que corresponde a capacidade de transporte determinado experimentalmente pelo procedimento um, enquanto que o D_c considerado foi de $0,0033g cm^{-2} s^{-1}$ também obtido

experimentalmente. Para adições de sedimentos (q_{so}) considerou-se valores de descarga sólida que variaram entre 0 g s^{-1} a $5,2\text{ g s}^{-1}$.

A Figura 5.29 mostra o resultado das simulações, onde se verifica, pela tendência de variação das formas das curvas que representam as descargas sólidas, uma certa similitude com as formas das curvas da Figura 5.28, ou seja são crescentes e tendem a um valor único. Pela Figura 5.29, verifica-se que a descarga sólida ao longo do canal apresenta um crescimento proporcional à taxa de adição de sedimentos que tende a atingir um ponto máximo e daí torna-se constante. Nessa ponto descarga sólida é equivalente a capacidade de transporte. A Figura 5.28 mostra uma tendência semelhante, porém o valor da taxa máxima de descarga sólida não corresponde à capacidade de transporte pelas razões já discutidas. De acordo com as Figuras 5.28 e 5.29, poder-se-ia afirmar que o modelo teórico de Foster e Meyer (1972a) é razoavelmente consistente embora com as limitações já discutidas de que o modelo não é capaz de prever as alterações das características hidráulicas do escoamento ocorridas durante às alterações da morfologia do sulco.

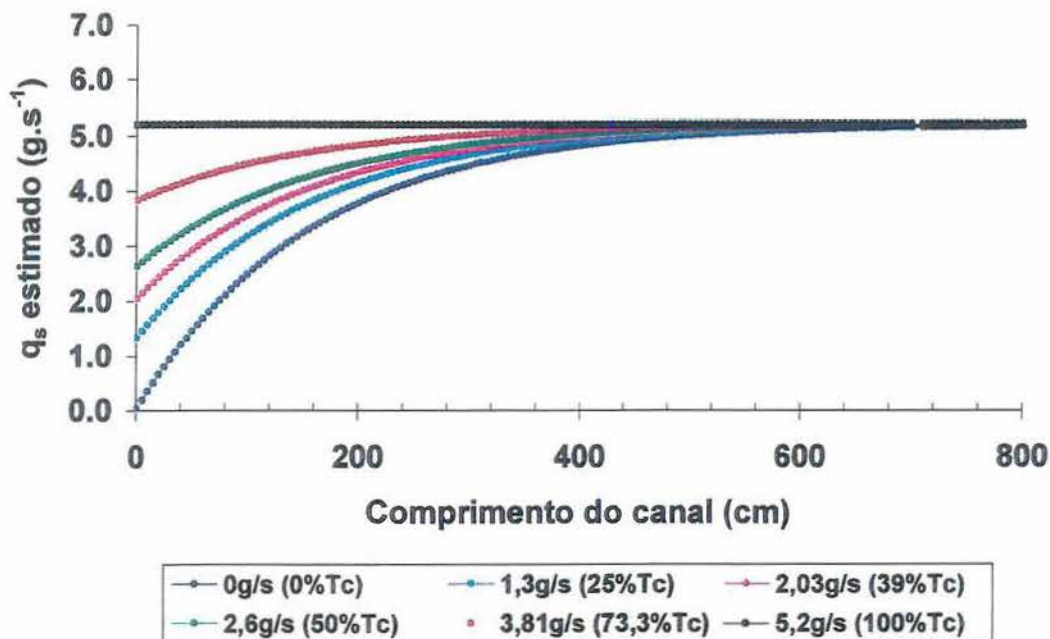


Figura 5.29 Resultado das simulações da descarga sólida prevista pela equação 5.13 para adições crescentes de sedimentos para um $Q=0,000122\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, $I=0,05\text{ m}^{-1}$ e $Tc=5,2\text{ g s}^{-1}$.

5.2.1.7 Determinação do tipo de transporte das descargas sólidas medidas

Com o objetivo de verificar se as taxas de adição de sedimento de alguma forma poderiam afetar o tipo de transporte de sedimentos, em função da suposição de que a presença de sedimentos reduz a intensidade turbulenta do escoamento (Einstein e Chien, 1955, Vanoni e Namicos, 1960 e Mendoza e Zhou, 1995) e, conseqüentemente, a quantidade de material sendo transportado por suspensão, procurou-se determinar o tipo de transporte da descarga de sedimento em função das taxas de adição de sedimentos no escoamento.

Para determinação da modalidade de transporte dos sedimentos coletados no exutório do canal, utilizou-se a relação proposta por Raudkivi (1990).

Na Tabela 5.13 constam os valores referentes à porcentagem em peso das diferentes classes de sedimentos que foram transportadas para as taxas de adição de sedimentos. Na Tabela 5.14 são apresentados os tipos de transporte calculados segundo critério de Raudkivi (1990), para as diferentes classes dos sedimentos. A partir das informações das Tabelas 5.13 e 5.14, foi construída a Tabela 5.15, que resume o tipo de transporte dos sedimentos para as diferentes taxas de adição de sedimento. Verifica-se pela Tabela 5.15, que se considerando um valor médio para as diferentes taxas de adição de sedimentos, o tipo de transporte predominante é o arraste (62,2%), seguido da suspensão (19,2%) e saltação (18,6%). Esses valores calculados estão de acordo com as observações visuais durante a realização dos ensaios que mostravam que a maior parte dos sedimentos eram transportados por arraste. Por outro lado, comparando-se a distribuição percentual dos diferentes tipos de transporte em função das diferentes taxas de adição de sedimentos, não foi possível verificar nenhuma tendência. Esperava-se, no entanto, observar uma redução da porcentagem de sedimentos transportados por suspensão para as maiores taxas de adição de sedimentos, uma vez que alguns autores como Einstein e Chien (1955), Vanoni e Nomicos (1960) e Mendoza e Zhou (1995) consideram que a presença de sedimentos é capaz de reduzir a intensidade turbulenta do escoamento e, conseqüentemente, a quantidade de sedimentos transportados por suspensão, uma vez que esse processo é dependente da intensidade turbulenta do escoamento.

Tabela 5.13 Porcentagem em peso das diferentes classes de sedimentos transportados em função das taxas de adição de sedimentos.

Diâmetro de peneira mm	q_s g s ⁻¹				
	0	2,03	3,81	6,13	7,49
	%				
>2	10,3	11,1	11,7	10,2	9,6
2-1	31,8	32,6	27,3	29,1	29,0
1-0,5	19,6	24,1	22,1	22,8	20,0
0,5-0,25	14,5	10,3	13,6	14,7	14,9
0,25-0,21	7,4	3,6	3,6	4,8	5,4
0,21-0,105	5,5	6,4	7,1	6,2	7,1
0,105-0,053	3,4	3,4	4,4	4,6	4,5
0,053-0,003	7,5	8,5	10,3	7,6	9,4

Tabela 5.14 Tipo de transporte dos sedimentos presentes na descarga sólida para diferentes taxas de adição de sedimentos.

Diâmetro de peneira mm	v_s m s ⁻¹	q_s g s ⁻¹														
		0			2,03			3,81			6,13			7,49		
		u- m s ⁻¹	v_s/u - m s ⁻¹	T ⁽¹⁾	u- m s ⁻¹	v_s/u - m s ⁻¹	T ⁽¹⁾	u- m s ⁻¹	v_s/u - m s ⁻¹	T ⁽¹⁾	u- m s ⁻¹	v_s/u - m s ⁻¹	T ⁽¹⁾	u- m s ⁻¹	v_s/u - m s ⁻¹	T ⁽¹⁾
>2	0,220	0,044	5,00	A	0,044	5,00	A	0,042	5,24	A	0,042	5,24	A	0,042	5,24	A
2-1	0,130	0,044	2,95	A	0,044	2,95	A	0,042	3,09	A	0,042	3,09	A	0,042	3,09	A
1-0,5	0,110	0,044	2,27	A	0,044	2,27	A	0,042	2,62	A	0,042	2,62	A	0,042	2,62	A
0,5-0,25	0,050	0,044	1,14	SA	0,044	1,14	SA	0,042	1,19	SA	0,042	1,19	SA	0,042	1,19	SA
0,25-0,21	0,030	0,044	0,68	SA	0,044	0,68	SA	0,042	0,71	SA	0,042	0,71	SA	0,042	0,71	SA
0,21-0,105	0,014	0,044	0,32	SU	0,044	0,32	SU	0,042	0,33	SA	0,042	0,33	SA	0,042	0,33	SA
0,105-0,0053	0,004	0,044	0,10	SU	0,044	0,10	SU	0,042	0,09	SU	0,042	0,09	SU	0,042	0,09	SU
0,0053-0,003	0,0005	0,044	0,01	SU	0,044	0,01	SU	0,042	0,01	SU	0,042	0,01	SU	0,042	0,01	SU

⁽¹⁾T=tipo de transporte conforme Raudkivi (1990) onde A=arraste, SA=saltação e SU=suspensão

Tabela 5.15 Tipo de transporte dos sedimentos presentes na descarga sólida para as diferentes taxas de adição de sedimentos.

q_s g s ⁻¹	Tipo de transporte		
	Arraste	Saltação	Suspensão
	%		
0	61,7	21,9	16,4
2,03	67,8	13,9	18,3
3,81	61,0	17,2	21,8
6,13	62,1	19,5	18,4
7,49	58,6	20,3	21,1
média	62,2	18,6	19,2

5.2.2. Avaliação do efeito da adição de sedimentos com granulometria uniforme na distribuição espacial das taxas de desagregação e de deposição de sedimentos

A segunda parte deste experimento foi conduzida de maneira semelhante à primeira, porém os sedimentos adicionados foram de granulometria uniforme formados por esferas de vidro de dois tipos: a) esferas de vidro com granulometria equivalente ao silte (ef); b) esferas de vidro com granulometria equivalente a areia grossa (eg). O tipo de transporte dos sedimentos adicionados foi determinado segundo o critério de Raudikivi (1990), onde verificou-se que as esferas com granulometria equivalente a silte e a areia grossa apresentaram, respectivamente, uma relação $u^*/w=0,07$ e $u^*/w=2,88$, significando que o material fino adicionado é transportado preferencialmente por suspensão, enquanto que o material mais grosseiro por arraste. A escolha desses materiais teve como objetivo verificar se a granulometria do material adicionado, composto por sedimentos transportados preferencialmente por suspensão e arraste, pudesse, de alguma forma, afetar as taxas de desagregação e deposição do solo.

Os valores das taxas de adição das esferas foram estabelecidos com base em ensaios preliminares, onde se procurou determinar uma condição de adição que conduzisse a uma deposição inicial leve do material adicionado, seguido de uma segunda condição em que houvesse uma maior deposição do material adicionado.

5.2.2.1 Condições experimentais, propriedades físicas da mistura água-sedimentos e características hidráulicas do escoamento

Nas Tabelas 5.16, 5.17 e 5.18 são apresentadas, respectivamente, as condições experimentais, propriedades físicas da mistura de água e sedimento e as características da hidráulica do escoamento. As variações entre as vazões de saída mostradas na Tabela 5.16 são atribuídas à condição da umidade antecedente conforme já referido.

As características hidráulicas do escoamento (Tabela 5.18) foram determinadas a partir da propriedades físicas da mistura de água e sedimento que constam na Tabela 5.17.

O regime hidráulico para todos os tratamentos foi supercrítico de transição. Verificou-se, também, através da análise estatística, que a granulometria das esferas não alterou as

propriedades físicas da mistura água e esferas, nem as características da hidráulica do escoamento para uma mesma taxa de sedimentos adicionados.

Tabela 5.16 Condições experimentais utilizadas no ensaio com adição de sedimentos de granulometria uniforme.

q_s $g\ s^{-1}$	Tipo de esferas	Repetições	$Q_{entrada}$ $m^3\ s^{-1}$	Q_{saida} $m^3\ s^{-1}$	Tempo total s	Tempo $Q_{constante}$ s	T^0 $^{\circ}C$
0,9	esferas finas	1	0,000122	0,000065	228,5	183,5	19
0,9	esferas finas	2	0,000122	0,000075	232,7	185,7	20
0,9	esferas finas	3	0,000122	0,000083	243,5	194,1	21
0,8	esferas grossas	1	0,000122	0,000069	248,1	200,5	18
0,8	esferas grossas	2	0,000122	0,000063	237	189,7	20
0,8	esferas grossas	3	0,000122	0,000082	233,2	185,7	21
3,3	esferas finas	1	0,000122	0,000071	239,3	199,3	19
3,3	esferas finas	2	0,000122	0,000062	237,6	203,5	21
3,3	esferas finas	3	0,000122	0,000069	235	192,5	20
3,1	esferas grossas	1	0,000122	0,000054	234,3	195,4	20
3,1	esferas grossas	2	0,000122	0,000052	242,7	190	20
3,1	esferas grossas	3	0,000122	0,000075	242,2	197,8	20

Tabela 5.17 Propriedades físicas da mistura de água e sedimentos do ensaio com adição de sedimentos de granulometria uniforme.

q_s $g\ s^{-1}$	Tipo de esfera	γ $N\ m^{-3}$	ρ_0	μ_m $N\ s\ m^{-2}$	ν_m $m^2\ s^{-1}$	ρ_m $kg\ m^{-3}$	C_v
0,9	esferas finas	10289,8	0,9692	0,001077	0,000001	1048,9	0,0308
0,8	esferas grossas	10317,4	0,9675	0,001081	0,000001	1051,7	0,0325
3,3	esferas finas	10288,7	0,9692	0,001077	0,000001	1048,8	0,0308
3,1	esferas grossas	10192,0	0,9752	0,001062	0,000001	1039	0,0248

Tabela 5.18 Características hidráulicas do escoamento para uma mistura de água e sedimentos do ensaio com adição de sedimentos de granulometria uniforme.

q_s $g\ s^{-1}$	Tipo de esfera	v $m\ s^{-1}$	h m	τ $N\ m^{-2}$	u_* $m\ s^{-1}$	Ω $kg\ s^{-1}$	ω $m\ s^{-1}$	Re	Fr
0,9	esferas finas	0,22	0,0034	1,74	0,041	0,38	0,0110	723,9	1,21
0,8	esferas grossas	0,23	0,0031	1,62	0,039	0,37	0,0113	693,8	1,3
3,3	esferas finas	0,20	0,0035	1,78	0,041	0,35	0,0098	655,7	1,08
3,1	esferas grossas	0,21	0,0028	1,43	0,037	0,31	0,0107	590,2	1,29

5.2.2.2 Descrição das deformações da amostra de solo após o ensaio

As deformações provocadas pelo escoamento, para as taxas de adição das esferas de $0,9\text{g s}^{-1}$ e $3,0\text{g s}^{-1}$, para os dois tipos de esferas, mostraram uma condição diferenciada. Para as adições de $0,9\text{g s}^{-1}$ com as esferas de granulometria grossa, observou-se que as deformações eram semelhantes à condição dos experimentos onde foi adicionado sedimento com granulometria extensa. Logo no início do contato do escoamento com o solo, formava-se uma fossa transversal com uma profundidade variando entre $0,025\text{m}$ a $0,03\text{m}$ que evoluía para um sulco entre $0,5\text{m}$ a $0,6\text{m}$ de largura e aproximadamente $0,01\text{m}$ de profundidade. Ao longo do canal, o sulco reduzia a profundidade de incisão e aumentava a largura até desaparecer, aproximadamente aos $1,3\text{m}$. A partir desse ponto, predominava o processo de deposição das partículas adicionadas e desagregadas e no trecho final ($6,0\text{m}$), ocorria novamente a desagregação com incisão do solo.

Com a adição de sedimentos finos a baixas taxas ($0,9\text{g s}^{-1}$), observou-se também a formação de uma fossa transversal, porém menos profunda (aproximadamente $0,020\text{m}$ a $0,025\text{m}$ de profundidade). Entretanto, a partir dessa fossa não foi observada, como nos outros ensaios, a incisão do solo, pois a desagregação ocorreu de forma uniforme logo nos primeiros centímetros do canal (primeiros $0,10\text{m}$). No trecho logo à frente da fossa, verificou-se pouca deposição do material injetado e a desagregação ocorreu sob forma de uma série de fossas espaçadas em intervalos de aproximadamente $0,20\text{m}$. A desagregação sob forma de incisão do solo formou-se em um trecho compreendido entre $0,40\text{m}$ - $0,60\text{m}$ do início do canal e prolongou-se até os $1,58\text{m}$. A partir desse ponto, predominou a deposição dos materiais desagregados e adicionados até o trecho correspondente aos $6,0\text{m}$ onde novamente passou a predominar a desagregação.

Para adições de esferas finas com granulometria uniforme a maiores taxas ($3,0\text{g s}^{-1}$) observou-se o seguinte: a fossa transversal que se formava logo no início do canal não se desenvolveu como nos demais tratamentos. Verificou-se, no entanto, uma intensa deposição do material injetado nos primeiros $0,10\text{m}$, cobrindo de forma uniforme a superfície do solo. Nessa condição, a desagregação ocorreu sob forma de fossas transversais que se formavam a intervalos irregulares ao longo do trecho compreendido entre $0,80\text{m}$ e $3,40\text{m}$ à jusante do início do canal. Algumas fossas maiores que se formaram nesse trecho deram origem a incisões que formaram sulcos e resultaram em significativa quantidade de massa desagregada de solo. No trecho correspondente a $3,4\text{m}$, o sulco foi dissipado e intensificava-se o processo

de deposição, enquanto no trecho final, como nos demais experimentos, volta a ocorrer a desagregação. Já para adição de esferas de granulometria grosseira, as deformações provocadas no solo seguiram o mesmo padrão quando adicionou-se solo como sedimento.

5.2.2.3. Efeitos da adição de sedimentos sobre a distribuição espacial das taxas de desagregação do solo e deposição de sedimentos

A representação espacial das taxas de desagregação e deposição de solo em função da adição de esferas pode ser visualizada nas Figuras 5.30 e 5.31. Na Figura 5.30 é mostrada a variação da taxa de desagregação e de deposição do solo em função das adições de esferas de granulometria fina e grossa para baixa taxa de adição, enquanto na Figura 5.31 é representada a mesma condição para uma maior taxa de adição de esferas. Na Figura 5.30 para efeito de comparação, foi acrescentada ao gráfico a condição da água sem sedimento. Já na Figura 5.31, além desta acrescentou-se também a curva que representa a adição de solo para uma taxa de adição semelhante à que foi utilizada com as esferas.

Para ambas as situações (altas e baixas taxas de adição de esferas de granulometria uniforme), devemos considerar o fato de que o efeito da granulometria do material injetado tenha influenciado o processo de desagregação somente no trecho próximo ao local de adição de sedimentos (local da fossa e suas proximidades), uma vez que ao longo do canal as esferas adicionadas e os sedimentos desagregados se misturaram e formaram uma nova composição granulométrica.

Avaliando a Figura 5.30, verificamos que, de uma maneira geral, o padrão de distribuição das curvas que representam as taxas de desagregação do solo ao longo do canal são similares e obedecem ao mesmo padrão das curvas que representam as taxas de desagregação e deposição para adições de sedimentos de granulometria extensa e água sem sedimentos. Uma pequena diferença entre as taxas de desagregação é verificada somente nos primeiros 20cm do início do canal (local onde se forma a fossa inicial). Nesse trecho, verifica-se uma menor taxa de desagregação para a adição de esferas finas, o que visualmente foi constatado pelo tamanho da fossa que foi inferior ao tamanho da fossa onde adicionaram esferas de granulometria grosseira, conforme já apresentado no item 5.2.2.2.

A similaridade entre o padrão das curvas que representam as taxas de desagregação para baixas taxas de adição de esferas comparado com água sem sedimento (Figura 5.30), indica que a quantidade de esferas adicionadas ao escoamento não foi suficiente para suprimir as taxas de desagregação do solo. Por outro lado, a menor taxa de desagregação observada para adição de esferas finas poderia estar indicando que, de alguma forma, a granulometria das esferas estaria influenciando as taxas de desagregação do solo.

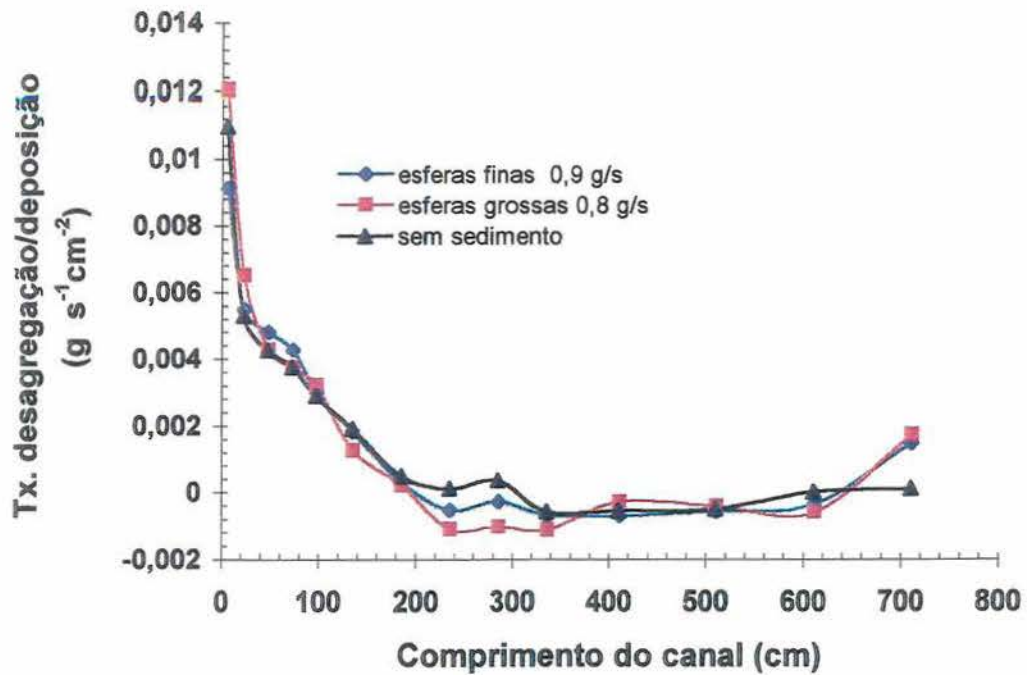


Figura 5.30 Taxa de desagregação e de deposição de solo em função das adições de $0,9 \text{ g s}^{-1}$ de esferas de granulometria fina e com granulometria grosseira e água sem sedimento.

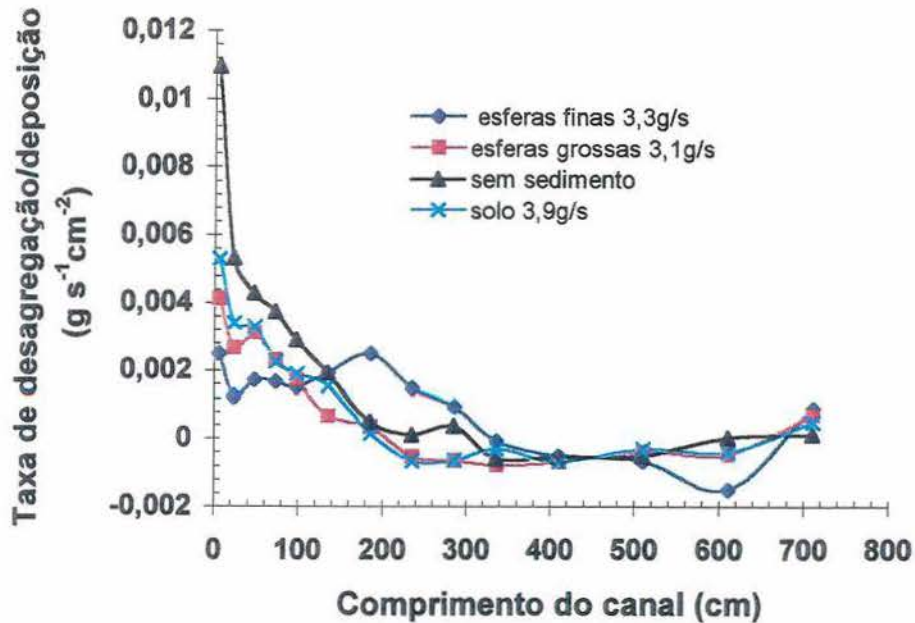


Figura 5.31 Taxa de desagregação e de deposição do solo em função das adições de 3g s^{-1} de esferas de granulometria fina, granulometria grosseira, água sem sedimento e sedimentos com granulometria extensa a uma taxa de adição de $3,9\text{g s}^{-1}$

Já na Figura 5.31, verifica-se que, tanto a presença das esferas adicionadas como também a granulometria dessas, influenciaram no padrão das curvas que representam as taxas de desagregação de solo e deposição de sedimentos. Constata-se, novamente, que no trecho inicial (0cm a 20cm), a menor taxa de desagregação ocorreu para adições de esferas finas e que, nos demais trechos, a curva que representa as taxas de desagregação para adições de esferas finas apresentou um padrão diferente das demais. Os diferentes padrões das curvas que representam as taxas de desagregação para adições de esferas finas e grossas indicam que, de alguma forma, a granulometria das esferas estaria influenciando o mecanismo de supressão da desagregação do solo.

O efeito da granulometria das esferas poderia influenciar o mecanismo de supressão das taxas de desagregação de duas maneiras: a) pela redução da turbulência do escoamento, conforme sugerido por Wilson (1993), uma vez que sedimentos finos, de uma maneira geral, tendem a reduzir a intensidade turbulenta do escoamento (Wang e Larsen, 1994); b) pelo efeito da atenuação das forças erosivas sobre o solo causado pelo trânsito e/ou depósito de

das esferas estaria relacionada com uma maior ou menor taxa de depósito ou então ao efeito de proteção da superfície do solo associado à granulometria das mesmas.

A constatação da influência da redução da intensidade turbulenta do escoamento causada pela presença das esferas finas não tem nenhuma evidência, uma vez que a intensidade turbulenta do escoamento não foi medida e também pelas tentativas indiretas de verificar esse efeito examinando no item 5.2.1.7. que também não mostraram nenhuma evidência. Porém, podemos especular que parte dos mecanismos responsáveis pela menor desagregação do solo, observada nos segmentos iniciais do canal para condição de adição das esferas com granulometria fina (Figuras 5.30 e 5.31), poderiam estar relacionados com a redução da intensidade turbulenta, uma vez que, para baixas taxas de adição (Figura 5.31), foi observada uma redução do tamanho da fossa, ainda que visualmente não tenha sido verificado sinais de depósito que poderiam indicar um efeito de proteção da superfície do solo contra ação das forças erosivas.

O segundo mecanismo responsável pela redução da desagregação, no entanto, parece mais evidente e confirma as observações realizadas no experimento 1 de que a supressão das forças erosivas que agem sobre o solo devem-se ao efeito de proteção do solo pelo trânsito e/ou depósito de sedimentos sobre o solo. As diferenças entre as curvas que representam as taxas de desagregação de solo para adição de esferas finas e grosseiras (Figura 5.31) estariam relacionadas à condição de que parte das esferas finas, ao serem transportadas pelo escoamento, ficavam retidas entre os grãos da superfície do solo e formavam uma superfície de proteção do solo mais estável que as esferas de granulometria grosseira. Isso explica porque o padrão de erosão, no tratamento onde foram adicionadas esferas de granulometria fina, foi diferente dos demais. A maior proteção inicial criada pelo depósito das esferas finas, impossibilitou, pelo menos no trecho inicial, o padrão de erosão verificado nos demais tratamentos onde ocorria a formação da fossa e, na seqüência, ocorria a incisão do solo. Para adições de esferas finas não ocorreu o desenvolvimento da fossa, impossibilitando que o escoamento reunisse as condições necessárias para provocar a incisão do solo.

A Figura 5.31 mostra também que os valores numéricos referentes às taxas de desagregação e de deposição para adição dos sedimentos com granulometria extensa e das esferas com granulometria uniforme e grossa foram similares ainda que as taxas de adição tenham sido ligeiramente diferentes ($3,3\text{g s}^{-1}$ para esferas grosseiras e $3,9\text{g s}^{-1}$ para sedimentos de granulometria extensa). Por outro lado, examinando-se a distribuição granulométrica dos

sedimentos com granulometria extensa e das esferas de granulometria grosseira verifica-se que este material apresenta um $d_{50}=650\mu\text{m}$, enquanto que as esferas de granulometria uniforme e grosseira o $d_{50}=510\mu\text{m}$, ou seja, os dois materiais apresentam uma granulometria equivalente à areia grossa. É possível que esta condição explique a similaridade entre as formas das curvas e os valores referentes às taxas de desagregação e de deposição do solo.

A análise comparativa das duas classes de esferas (granulometria fina e grosseira), na condição de baixa taxa de adição de esferas (Tabela 5.19), mostrou não haver diferença estatística entre as variáveis avaliadas. Por outro lado, para as maiores taxas de adição, os resultados mostraram uma diferença estatística significativa a 5% para a desagregação total, para a concentração de sedimentos e para o comprimento do início de depósito. Nessa condição, observou-se que a desagregação total, a concentração de sedimentos e o comprimento para início de depósito foram maiores no tratamento onde foram injetadas esferas com granulometria fina. A explicação para tais resultados, já foi comentada durante a discussão das taxas de desagregação para injeção dos sedimentos finos (Figura 5.31), verificando-se que as taxas de desagregação permaneceram elevadas por um trecho maior que os demais tratamentos, o que, conseqüentemente, provocou uma maior desagregação total.

Tabela 5.19 Efeito da adição de esferas com granulometria equivalente a silte e areia grossa nas condições hidráulicas do escoamento, e na desagregação e deposição total e no comprimento necessário para início de deposição.

q_s g s^{-1}	Tipo de esfera	Repetições	q_s saída g s^{-1}	$C_{g/l}$ g l^{-1}	Desagregação total g	Deposição total g	Comprimento para deposição m
0,9	esferas finas	1	5,13	71,27	1167,1	703,1	2,10
0,9	esferas finas	2	7,09	86,26	1222,7	579,8	1,70
0,9	esferas finas	3	6,74	75,39	1541,4	565,9	1,70
		média	6,32	77,64	1310,4	616,3	1,83
0,8	esferas grossas	1	6,01	81,48	1306,8	609,7	1,70
0,8	esferas grossas	2	5,52	80,91	1171,5	774,3	1,70
0,8	esferas grossas	3	7,19	83,11	1422,7	560,8	1,70
		média	6,24	81,83	1300,3	648,3	1,70
3,3	esferas finas	1	6,22	86,98	1503,5	1022	2,90
3,3	esferas finas	2	4,87	74,32	1030,4	689,8	3,50
3,3	esferas finas	3	5,26	71,40	1020,2	386,3	4,10
		média	5,45	77,57	1184,7	699,4	3,50
3,1	esferas grossas	1	3,39	61,95	739,5	630,2	2,10
3,1	esferas grossas	2	3,58	62,12	633,8	788,2	1,90
3,1	esferas grossas	3	5,37	65,31	709,8	482,1	1,70
		média	4,11	63,13	694,4	633,5	1,90

Esses resultados mostram que a redução das taxas de desagregação por efeito da descarga sólida adicionada não está condicionada somente à quantidade de sedimento presente no escoamento, mas também à granulometria dos sedimentos que compõem a descarga sólida. Aparentemente, o depósito de sedimentos finos oferece uma maior proteção da superfície do solo contra ação das forças erosivas do escoamento, que agem sobre a superfície e, conseqüentemente, as taxas de desagregação são menores. Outra possibilidade em relação ao efeito da presença de sedimentos finos em relação a supressão das forças de desagregação do solo seria a de que os sedimentos finos poderiam estar modificando a estrutura turbulenta do escoamento de forma a reduzir a intensidade turbulenta do escoamento e conseqüentemente a desagregação do solo.

5.3. Resumo dos resultados

Em relação aos efeitos da adição de sedimentos sobre as características hidráulicas do escoamento, os resultados obtidos nesse trabalho mostram que as adições crescentes de sedimentos transportados por arraste resultaram em aumento da altura e redução da velocidade do escoamento. A redução da velocidade do escoamento pela presença de sedimentos deveu-se, principalmente, aos efeitos de resistência causado pelo aumento da rugosidade devido à presença de sedimentos em trânsito, sendo quantificada pelo fator perda de carga (f). O fator perda de carga apresentou uma tendência clara de aumentar com a adição de sedimentos, sendo que a presença dos sedimentos em trânsito contribuiu com um valor aproximado de 20% do fator perda de carga total (f_i) quando a descarga sólida situa-se próximo da capacidade de transporte.

Outro aspecto verificado no trabalho foi que a capacidade de transporte estimada pelas equações utilizadas nos modelos de predição de erosão subestimaram a capacidade de transporte quando comparado com valores determinados experimentalmente. As diferenças entre os valores estimados e aqueles determinados experimentalmente variaram entre 40% a 80%, dependendo da equação utilizada.

Os efeitos da adição de sedimentos sobre a desagregação do solo e da deposição de sedimentos mostraram que, tanto as taxas de adição de sedimentos como a granulometria dos sedimentos adicionados, influenciaram-na de forma bastante significativa, de maneira que o aumento da adição de sedimentos resultou em menores taxas de desagregação e maiores taxas

de deposição. Por outro lado, a distribuição espacial das taxas de desagregação e de deposição mostrou um padrão de erosão onde ocorrem zonas preferenciais de desagregação e de deposição independentemente das adições de sedimento serem menores que a capacidade de transporte do escoamento. A partir do padrão de erosão observado nesse trabalho foi possível verificar, também, que os modelos de Foster e Meyer (1972a) e Hairsine e Rose (1992) apresentam uma consistência razoável com o padrão de erosão observado no trabalho, ainda que esses modelos não sejam capazes de prever a deposição observada nas condições onde a taxa de adição de sedimentos é inferior à capacidade de transporte.

Os resultados experimentais também mostraram fortes evidências de que o mecanismo responsável pela redução das taxas de desagregação provocado pela adição de sedimentos está relacionado com o efeito de proteção da superfície do solo criado pelos sedimentos em depósito ou trânsito, os quais protegem a superfície do solo contra ação das forças erosivas. Além disso, mostram que o efeito de proteção não é apenas função da quantidade de sedimentos em depósito ou trânsito, mas também é função da sua granulometria.

6. Conclusões e Recomendações

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho é possível concluir que:

- A utilização de cilindros contendo agregados de solo para serem submetidos a ação do escoamento em canais de laboratório mostrou ser inadequado aos estudos referentes a dinâmica da erosão em sulco devido ao tamanho reduzido da amostra, enquanto que, o uso de caixas conectadas em seqüência mostrou ser adequado para avaliar os efeitos da distribuição espacial dos processos de desagregação do solo e deposição de sedimentos;
- A presença de sedimentos transportados por arraste afetou as condições hidráulicas do escoamento, uma vez que adições crescentes de sedimentos provocaram um aumento da altura da lâmina de água, uma redução na velocidade do escoamento e um aumento do fator perda de carga (f);
- Os valores referentes a capacidade de transporte de sedimentos estimada pelas equações utilizadas nos modelos de predição de erosão subestimaram a capacidade de transporte quando comparados com valores determinados experimentalmente;
- As taxas de desagregação de solo e de deposição de sedimentos mostraram uma relação de dependência com as adições crescentes de sedimentos, pois o aumento da adição de sedimentos resultou em menores taxas de desagregação de solo e maiores taxas de deposição de sedimentos;
- Os modelos de Foster e Meyer (1972a) e Hairsine e Rose (1992) mostraram, de uma maneira geral, serem parcialmente consistentes com o padrão de erosão observado no trabalho;
- Existem fortes evidências de que o mecanismo responsável pela redução das taxas de desagregação do solo provocado pela adição de sedimentos está relacionado com o efeito de proteção da superfície do solo criado pelos sedimentos em depósito ou trânsito.

Como recomendações, sugere-se o seguinte:

- Estudar, de forma mais detalhada, os efeitos da adição de sedimentos sobre o aumento da resistência ao escoamento, principalmente para condições onde a descarga sólida encontra-se próxima da capacidade de transporte;
- Obtenção do fator de correção α para os valores de velocidade determinado pelo método da tinta traçadora;
- Incrementar os estudos de laboratório e de campo relacionados a caracterização hidráulica da mistura água-sedimento em condições de escoamentos de pouca espessura de lâmina de água, alta declividade e sobre meios coesivos;
- Utilizando-se a metodologia desenvolvida no experimento 2, dar seqüência aos estudos relacionados a dinâmica da erosão em sulcos alterada pelo incremento da descarga sólida, para diferentes vazões, declividades, tipos de solo e granulometria de materiais adicionados.

7. Referências Bibliográficas

- 1 ABRAHAMS, Athol D., ATKINSON, Joseph F. 1993. Relation between grain velocity and sediment concentration in overland flow. *Water Resources Research*, Washington, v.29, n.9, p.3021-3028, Sept.
- 2 ABRAHAMS, Athol D., LI, G. 1998. Effect of saltating sediment on flow resistance and bed roughness in overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, New York, v.14, p.953-960.
- 3 ABRAHAMS, Athol D., PARSONS, Anthony J. 1991. Resistance to overland flow on desert pavement and its implications for sediment transport modeling. *Water Resources Research*, Washington, v.27, n.8, p.1827-1836, Aug.
- 4 ABRAHAMS, Athol D., PARSONS, Anthony J., LUK, S.H. 1986. Resistance to overland flow on desert hillslopes. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.88, n.3/4, p.343-363.
- 5 ALMEIDA, Luiz Emílio Sá Brito de. 1980. Contribuição à previsão da capacidade de transporte por arraste em canal de fundo fixo, Porto Alegre: UFRGS - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 107f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil).
- 6 ALONSO, C.V., NEIBLING, W.H., FOSTER, G.R. 1981. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, v.24, n.5, p.1211-1220, 1226.
- 7 AZIZ, N., SCOTT, D.E. 1989. Experiments on sediment transport in shallow flows in high gradient channels. *Hydrological Sciences Journal*, Wallingford, v.34, n.4, p.465-478, Aug.
- 8 BAGNOLD, R.A. 1977. Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research*, Washington, v.13, p.303-312.

- 9 BORGES, Ana Luiza de Oliveira. 1987. Determinação da capacidade máxima de transporte por arraste de um escoamento sobre fundo móvel, Porto Alegre: UFRGS - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 166f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil).
- 10 BRYAN, R.B. 1987. Processes and significance of rill development. *Catena Supplement*, Braunschweig, n.8, p.1-15.
- 11 CHANG, H. 1988. *Fluvial processes in river engineering*. New York: John Wiley. 432p.
- 12 COCHRANE, T.A., FLANAGAN, D.C. 1996. Detachment in a simulated rill. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, v.40, n.1, p.111-119.
- 13 COSTA, Alfredo Ribeiro da. 1974. Contribuição à previsão de depósito de sedimentos em canal a fundo fixo, Porto Alegre: UFRGS - Curso de Pós-Graduação em Hidrologia Aplicada. 103f. Dissertação (Mestrado Hidrologia Aplicada).
- 14 EINSTEIN, H.A. 1968. Deposition of suspended particles in a gravel bed. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, New York, v.94, n.5, p.1197-1205, Sept.
- 15 EINSTEIN, H.A., CHIEN, N. 1955. Effects of heavy sediment concentration near bed on velocity and sediment distribution. Berkeley: University of California. p.1-96.
- 16 ELLIOT, W.J. 1988. A process-based rill erosion model. Ames: Iowa State University. 110f. Tese (Ph.D).
- 17 ELLISON, W.D. 1947. Soil erosion studies: part 1. *Agricultural Engineering*, Saint Joseph, v.28, p.145-146.
- 18 ELLISON, W.D., ELLISON, O.T. 1947a. Soil erosion studies: part 6 Soil detachment by surface flow. *Agricultural Engineering*, Saint Joseph, v.28, p.402-408.
- 19 ELLISON, W.D., ELLISON, O.T. 1947b. Soil erosion studies: part 7 Soil transportation by surface flow. *Agricultural Engineering*, Saint Joseph, v.28, p.442-444, 450.

- 20 EMBRAPA. 1999. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. Brasília: Serviço de Produção de Informações. 412p.
- 21 FOSTER, G.R. 1982. Modeling the erosion process. In: HAAN, C., JOHNSON, H., BRAKENSIEK, D., ed. Hydrologic modeling of small watersheds. Saint Joseph: ASAE. p.295-380.
- 22 FOSTER, G.R., HUGGINS, L.F., MEYER, L.D. 1984. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationships. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v.27, p.790-796.
- 23 FOSTER, G.R., MEYER, D. 1972a. A closed-form soil erosion equation for upland areas. In SHEN, Hsieh Wen, ed. Sedimentation, Fort Collins: Colorado State University. ch.12, p. 1-19.
- 24 FOSTER, G.R., MEYER, D. 1972b. Transport of soil particles by shallow flow. Transaction of the ASAE, Saint Joseph, v.15, n.1, p.99-112.
- 25 GARCIA, Edson Pinto. 1983. Contribuição à previsão da capacidade de transporte em canais de fundo fixo e móvel, Porto Alegre: UFRGS - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 191f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil).
- 26 GILLEY, J.E., KOTTWITZ, E.R., SIMANTON, J.R. 1990. Hydraulic characteristics of rill, Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v.33, p.1900-1906.
- 27 GOVERS, G. 1985. Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion. Catena, New York, v.12, p.35-49.
- 28 GOVERS, G. 1992. Relationship between discharge, velocity and flow area for rill eroding loose, non-layered materials. Earth Surface Processes and Landforms, New York, v.17, p.515-528.
- 29 GOVERS, G. 1996. Soil erosion process research: a state of the art. Brussel: Paleis der Academien. p.4-53.

- 30 GOVERS, G., RAUWS, G. 1986. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds. *Earth Surface Processes and Landforms*, New York, v.11, p.515-524.
- 31 GUY, B.T., DICKINSON, R.P., RUDRA, R.P. 1992. Evaluation of fluvial sediment transport equations for overland flow: the roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, v.30, n.2, p.545-555.
- 32 HAIRSINE, P.B., MCTAINSH, G. 1986. The Griffith Tube: a simple settling tube for the measurement of settling velocity of aggregates. Griffith: Griffith University. p.3-86.
- 33 HAIRSINE, P.B., ROSE, C.W. 1992. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: 1. Sheet flow. *Water Resources Research*, Washington, v.28, p.237-243.
- 34 HORTON, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, v.56, p 275-370.
- 35 JULIEN, P.Y. 1995. *Erosion and sedimentation*. Cambridge: Cambridge University. 280p.
- 36 LAMBE, T.W., WHITMAN, R.V. 1969. *Soil mechanics*. New York: John Wiley. 553p.
- 37 LEI, Tingwu, NEARING, Mark A., HAGHIGHI, Kamyar, BRALTS, Vicent F. 1998. Rill erosion and morphological evolution: a simulation model. *Water Resources Research*, Washington, v.34, n.11, p.3157-3168, Nov.
- 38 LI, Gang, ABRAHAMS, A.D. 1997. Effect of saltating sediment load on the determination of the mean velocity of overland flow. *Water Resources Research*, Washington, v.33, n.2, p.341-347, Feb.

- 39 LI, Gang, ABRAHAM, A.D., ATKINSON, J.F. 1996. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, New York, v.21, p.509-515.
- 40 MEDEIROS, Pericles Alves. 1986. Efeito da rugosidade de fundo sobre a formação dos depósitos em canal de fundo fixo e rugoso, Porto Alegre: UFRGS - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 143f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil).
- 41 MENDONZA, Cesar, ZHOU, Donghuo. 1995. A dynamic approach to sediment-laden turbulent flows. *Water Resources Research*, Washington, v.31, n.12, p.3075-3087, Dec.
- 42 MENDONZA, Cesar, ZHOU, Donghuo. 1997. Energetics of sediment-laden streamflows. *Water Resources Research*, Washington, v.33, n.1, p.227-234, Jan.
- 43 MERRIT, E. 1984. The identification of four stages during micro-rill development. *Earth Surface Processes and Landforms*, New York, v.9, p 493-496.
- 44 MEYER, L.D., FOSTER, G.R.; ROMKENS, M.J.M. 1975. Source of soil eroded by water from upland slopes. In: *Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources*. Washington: USDA Agricultural Research Service. p.177-189.
- 45 MEYER, L.D., MONKE, E.J. 1965. Mechanics of soil erosion by rainfall and overland flow. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, v.8, n.4, p.572-577.
- 46 MOORE, I.D., BURCH, G.J. 1986. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory. *Water Resources Research*, Washington, v.22, n.8, p.1350-1360, Aug.
- 47 MORGAN, R.P.C. 1995. *Soil erosion and conservation*. London: Longman. p.198.
- 48 MORGAN, R.P.C., QUINTON, J.N., SMITH, R.E., GOVERS, G., POESEN, J.W.A., AUERSWALD, K., CHISCI, G., TORRI, D., STYCZEN, M.E. 1998. *The European*

- soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, New York, v.23, p.527-544.
- 49 MOSS, A.J., GREEN, P., HUTKA, J. 1982. Small channels: their experimental formation, nature, and significance. *Earth Surface Processes and Landforms*, New York, v. 7, p.401-415.
- 50 NEARING, M.A., BRADFORD, J.M., PARKER, S.C. 1991. Soil detachment by shallow flow at low slopes. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.55, p.339-344.
- 51 NEARING, M.A., FOSTER, G.R., LANE, L.J., FINKNER, S.C. 1989. A process-based erosion model for USDA- Water Erosion Prediction Project Technology. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, v.32, n.5, p.1587-1593.
- 52 NEARING, M.A., NORTON, L.D., BULGAKOV, D.A., LARIONOV, G.A., WEST, L.T., DONTSOVA, K.M. 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research*, Washington, v.33, n.4, p.865-876.
- 53 NEARING, M.A., PARKER, S.C. 1994. Detachment of soil by flowing water under turbulent and laminar conditions. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.58, p.1612-1614.
- 54 NEIBLING, W.H., G.R., FOSTER, G.R. 1981. Transport and deposition of soil particles by shallow flow. *Purdue Journal*, West Lafayette, n.9480, p.943-964.
- 55 PARSONS, Anthony J., ABRAHAMS, Athol D., LUK, Shiu-Hung. 1990. Hydraulics of interrill overland flow on a semi-arid hillslope, southern Arizona. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.117, p.255-273.
- 56 QUIRCK, J.P., PANABOKKE, C.R. 1962. Incipient failure of soil aggregates. *Journal of Soil Science*, London, v.13, n.1, p.60-65.

- 57 RAUDKIVI, A.J. 1990. Loose boundary hydraulics. 3.ed. Oxford: Pergamon. ch.7 p.142-209.
- 58 RAUWS, G. 1987. The initiation of rill on plane beds of non-cohesive sediments. *Catena Supplement, Braunschweig*, n.8, p 107-118.
- 59 RAUWS, G., GOVERS, G. 1988. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. *Journal of Soil Science, London*, v.39, p.111-124.
- 60 RICE, C.T., WILSON, B.N. 1990. Analysis of dynamic variables of rill flow. Saint Joseph: ASAE.
- 61 SAVAT, J. 1980. Resistance to flow in rough supercritical sheet flow. *Earth Surface Processes and Landforms, New York*, v.5, p.103-122.
- 62 SILVESTRINI, Jorge Hugo. 1991. Relações entre a capacidade de transporte por arraste e o depósito de sedimentos em um canal de fundo fixo rugoso. Porto Alegre: UFRGS – Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).
- 63 SIMONS, Daryl B., SENTÜRK, Fuat. 1977. *Sediment Transport Technology*. Fort Collins: Water Resource Publications. 807p.
- 64 SLATTERY, M.C., BRYAN, R. 1992. Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment. *Earth Surface Processes and Landforms, New York*, v.17, p.127-146.
- 65 VANONI, V.A., NOMICOS, G.N. 1960. Resistance properties of sediment-laden streams. *Transactions of the American Society of Civil Engineers, New York*, v.125, p.1140-1175.
- 66 WANG, Zhaoyin, LARSEN, Peter. 1994. Turbulent structure of water and clay suspensions with bed load. *Journal of Hydraulic Engineering, New York*, v.120, n.5, p.577-600, May.

- 67 WILSON, B.N. 1993. Development of a fundamentally based detachment model. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v.36, n.4, p.1105-1114.
- 68 YALIN, M. Selim. 1963. An expression for bed-load transportation. Journal of the Hydraulics Division. American Society of Civil Engineers, New York, v.89, n.3, p.221-250, May.
- 69 YANG, Chih Ted. 1972. Unit stream power and sediment transport. Journal of the Hydraulics Division. American Society of Civil Engineers, New York, v.98, n.10, p.1805-1826, Oct.