

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**GERAÇÃO DE SULCOS EM MEIO COESIVO E CARACTERIZAÇÃO
HIDROSEDIMENTOMÉTRICA DE SUA EVOLUÇÃO**

AMAURI ANTUNES BARCELOS

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

Orientadora: Prof^a. Ana Luiza de Oliveira Borges

Banca Examinadora

Prof. Elírio Toldo Júnior	CECO - IG - UFRGS
Prof. Gustavo Henrique Merten	IPH - UFRGS
Prof. José Miguel Reichert	Depto. de Solos - CCR - UFSM

Porto Alegre, dezembro de 2005

Ao Rodrigo, que na sua simplicidade e clarividência de espírito é capaz de superar uma a uma as barreiras que vão aparecendo no decorrer da sua vida.

À Carla, que pela sua força, energia, capacidade de superar obstáculos, envolvimento com a vida, companheirismo e amor, conseguiu fazer com que eu me envolvesse totalmente na realização deste trabalho.

Aos demais membros da família, que foram o ponto de partida e a referência para os passos seguintes.

Apresentação

O presente estudo foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), dentro da área de concentração Erosão e Sedimentação, no Setor de Hidráulica Aplicada e no Laboratório de Processos Erosivos e Depositionais (LaPED) sob a orientação da professora Ana Luiza de Oliveira Borges.

Agradecimentos

Neste primeiro momento, gostaria de agradecer a professora Ana Luiza de Oliveira Borges pela orientação competente e segura, pela confiança em mim depositada. Além disso, pela presença constante nos momentos de intranqüilidade tanto na fase acadêmica como nas fases experimentais e de finalização do trabalho escrito e, especialmente, nos momentos de alegria quando as idéias estavam se tornando realidade.

A Carolina Holz Boffo pela sua participação e envolvimento constante nas atividades, desde a fase experimental até as etapas de preparo dos dados coletados e montagem das superfícies no programa computacional SURFER®.

Ao pesquisador da EMBRAPA–Centro Nacional de Pesquisa de Trigo José Eloir Denardin e ao técnico agrícola Luiz Alberi pelo fundamental apoio para a obtenção, a coleta e o transporte do solo desde Passo Fundo até Porto Alegre.

Aos professores que convivem no Setor de Hidráulica Aplicada do IPH, em especial, aos professores Rogério Dornelles Maestri e Paulo Kroeff de Souza pelas excelentes contribuições nas etapas de planejamento, montagem da estrutura experimental e por ocasião da elaboração e dos testes da metodologia de moldagem dos sulcos de erosão e no desenvolvimento do trabalho de tese.

Aos professores Elírio Toldo Jr., José Miguel Reichert e Franz Semmelmann pela participação e contribuição por ocasião da realização do Exame de Qualificação. Ao professor Franz Semmelmann agradeço também pelas lições na disciplina de Erosão e Sedimentação e pelas esclarecedoras conversas no Laboratório de Sedimentos. Ao professor José Miguel pelo incentivo e pela oportunidade criada para o primeiro contato com a professora Ana Luiza.

Aos colegas do Laboratório de Sedimentos, àqueles das primeiras horas no IPH, Carlos Alberto Rockenbach, Gustavo Henrique Merten, Jorge Zegarra Tarqui e Walter Collischonn e ao companheiro de todas as horas José Ramon Barros Cantalice. Aos colegas mais recentes Jean Paolo Gomes Minella, Melissa Franzen e Cristiano Poletto. Além disso, é importante lembrar que o,

hoje, professor Gustavo foi a pessoa que me deu estímulo para seguir os caminhos que deram origem a este trabalho, a partir da sua experiência na construção do canal de vidro, dos artigos e das fotos disponibilizadas por ele após o seu retorno do National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL).

Ao professor Salles, que já na primeira semana de aula passou da condição de mestre para a categoria dos amigos especiais. Uma das grandes contribuições do PPGRHSA, durante a minha passagem pelo IPH, foi a de ter possibilitado o meu encontro com alguém de excelente formação, íntegro, crítico, veemente nos seus pontos de vista e, além disso, um excelente professor de Matemática.

Aos grandes amigos Ivania e Elton Farina que sempre estiveram presentes ao meu lado e da Carla e que forneceram todo o suporte necessário para que os equipamentos de informática funcionassem a pleno e que contribuíram para a melhoria da arte final das figuras apresentadas neste texto.

Na solução dos problemas do dia a dia, a equipe de apoio e logística do IPH foi de fundamental importância. Portanto, nas pessoas de Bruno da Silva Rocha, Sérgio Silva Rodrigues, Marco Aurélio Gomes da Rosa (M. Tyson), Nadir Solari, Jussara Silva e Jussara Barbieri, eu expresseo o meu agradecimento à Instituição.

Ao CNPq pela disponibilização da bolsa de estudo , a FAPERGS pela ajuda financeira prestada para a montagem da estrutura experimental e ao PPGRHSA pela contribuição para a compra do material de moldagem.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente auxiliaram na realização deste trabalho desejo, algum dia, poder retribuir ou estar em condições de ajudar a outras pessoas de forma semelhante.

Por fim, agradeço a todos os brasileiros que mantêm viva a escola pública no país. Foi o ensino público que possibilitou a minha formação e a partir desta base me permitiu chegar até uma Universidade pública capaz de viabilizar a realização deste trabalho.

GERAÇÃO DE SULCOS EM MEIO COESIVO E CARACTERIZAÇÃO HIDROSEDIMENTOMÉTRICA DE SUA EVOLUÇÃO ⁽¹⁾

Autor: Amauri Antunes Barcelos

Orientadora: Ana Luiza de Oliveira Borges

Resumo – Na pesquisa em erosão, nas últimas décadas, está se formando um consenso de que é importante entender os processos básicos que regem o fenômeno. Uma alternativa para tentar compreender melhor as etapas do processo erosivo é separá-lo na fase de sulco (fluxo concentrado) e de entressulco. Dentro desse enfoque foi construído no Laboratório de Processos Erosivos e Depositionais (LaPED) do IPH/UFRGS um canal de declividade para estudar o processo de incisão e o desenvolvimento dos sulcos de erosão. A estrutura experimental projetada e construída permite que seja controlada a vazão através de um medidor eletromagnético e que seja alterada a declividade do canal através de um sistema hidráulico associado a um nível digital. O solo colocado no canal foi um Latossolo Vermelho distrófico típico, as declividades de trabalho foram 3,0; 6,0 e 9,0% e a seqüência de vazões aplicadas foi 10,0; 18,5; 25,5; 38,5 e 51,0L.min⁻¹. A estrutura experimental montada se mostrou de fácil operação e eficiente para permitir o avanço no entendimento dos processos de desagregação e de transporte de partículas sólidas pela ação do escoamento superficial, além de possibilitar a geração de sulco(s) de erosão na superfície do solo. O escoamento passou da condição de difuso para concentrado a partir do momento em que a velocidade superficial do fluxo alcançou 0,26m.s⁻¹, a altura de lâmina atingiu 0,0102m, a velocidade de cisalhamento superou os 0,059m.s⁻¹, a tensão de cisalhamento chegou a 3,50Pa e que a potência do escoamento atingiu pelo menos 0,22N.s⁻¹. O processo de incisão iniciou-se com o canal experimental colocado em baixa declividade e em regime de escoamento sub-crítico e de transição. A velocidade de cisalhamento, no momento da incisão, foi, praticamente, o dobro daquela encontrada na literatura para solos siltsos e arenosos. Entretanto, para as três declividades a fase de sulco definido ocorreu somente em regime de escoamento turbulento. A tensão de cisalhamento foi o parâmetro que melhor descreveu a evolução da perda de solo. A potência do escoamento foi o parâmetro hidráulico que mostrou maior eficiência para separar as fases evolutivas dos sulcos. O desenvolvimento do(s) sulco(s) teve o seu início em uma condição de escoamento difuso (ausência de sulcos) e com a potência do escoamento oscilando entre 0,057 e 0,198N.s⁻¹. O avanço do(s) sulco(s) começou com uma zona de transição (fase de incisão e de aprofundamento) onde a potência do escoamento varia entre 0,220 e 0,278N.s⁻¹ e, logo em seguida, teve início a fase de sulco definido, com a potência do escoamento entre 0,314 e 0,544N.s⁻¹. Na fase de escoamento concentrado foi preponderante o papel do processo de erosão regressiva para aumentar tanto o tamanho como o peso das partículas sólidas em transporte pelo escoamento superficial e assim fazer com que predominasse o transporte via fundo sobre o transporte via suspensão. As cargas de sedimento geradas nos solos de diferentes classes texturais foram separadas em grupos distintos em função da potência unitária do escoamento.

⁽¹⁾ Tese de doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisa Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul (156.) – Dezembro de 2005.

A HYDROSEDIMENTOMETRIC DESCRIPTION OF RILL FORMATION IN A COHESIVE SOIL ⁽¹⁾

Author: Amauri Antunes Barcelos

Advisor: Ana Luiza de Oliveira Borges

Abstract – Within the field of erosion research, a consensus has been forming during the past few decades that it is important to understand the basic processes responsible for the phenomenon. One of the strategies toward a better understanding of the stages of erosion is to separate the rill (concentrated flow) and inter-rill phases. With this in mind, was constructed in the Erosive and Depositional Processes Laboratory (LaPED) of the Hydraulic Research Institute of the Federal University of Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) an experimental flume with which to study the process of incision and rill development. This structure enables flow rate to be controlled via an electromagnetic sensor, and the grade to be changed using a hydraulic system associated with a digital level. The soil placed in the flume was a typical dystrophic red oxisol, the working slopes were 3.0, 6.0 and 9.0% and the sequence of flow rates applied were 10.0, 18.5, 25.5, 38.5 and 51.0 L.min⁻¹. The flume proved easy to operate and was an efficient way to advance in the understanding of disaggregation and solid particle transport processes via surface runoff, as well as enabling the creation of rills on the soil surface. Runoff, initially diffuse, became concentrated once the surface flow rate reached 0.26m.s⁻¹, the height of the sheet of water reached 0.0102m, shear velocity exceeded 0.059m.s⁻¹, shear stress reached 3.5Pa, and stream power reached approximately 0.22N.s⁻¹. The incision process began when the flume was at low slope and with sub-critical and transitional runoff regimes. Shear velocity, at the moment of incision, was practically double that encountered in the literature for silty and sandy soils. Nonetheless, for the three slopes used, the rill phase occurred only with turbulent runoff. Shear stress was the parameter which best described the evolution of soil loss, while stream power was the most efficient hydraulic parameter for separating the different evolutionary phases of the rills. With diffuse runoff (without rills), the stream power oscillated between 0.057 and 0.198N.s⁻¹. Rill progression began with a transitional period (incision and deepening phases) in which the stream power varied between 0.220 and 0.278N.s⁻¹, and was immediately followed by the defined rill phase, with stream power between 0.314 and 0.544N.s⁻¹. During the concentrated runoff phase, regressive erosion processes played a key role in increasing both the size and weight of the particles being transported by the surface runoff, so that bed load transport predominated over suspended sediment transport. The sediment loads generated with soils of different textural classes were separated in different groups depending on their unit stream power.

⁽¹⁾ Doctoral thesis in Water Resources and Environmental Sanitation, Graduate Program in Water Resources and Environmental Sanitation Engineering, Hydraulics Research Institute, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul (156p.) – December, 2005.

Sumário

	Página
Apresentação	III
Resumo	V
Abstract	VI
Sumário	VII
Relação de Tabelas	XI
Relação de Figuras	XIII
Relação de Símbolos e Abreviaturas	XVII
1.- Introdução	1
2.- Objetivos	4
3.- Revisão Bibliográfica	5
3.1.- Introdução	5
3.2.- Erosão hídrica	5
3.2.1.- Conceituação	6
3.2.2.- Desenvolvimento do processo erosivo	7
3.2.3.- Incisão e aprofundamento dos sulcos de erosão	10
3.2.4.- Rede de sulcos	13
3.3.- Base hidrossedimentológica da erosão	14
3.3.1.- Geração do escoamento superficial	14
3.3.2.- Escoamento difuso e concentrado	15
3.3.3.- Características hidráulicas do escoamento superficial	17
3.3.4.- Início do movimento de partículas	22
3.3.5.- Condições hidráulicas necessárias ao início da formação de sulcos	25
3.4.- Princípios básicos para quantificar o processo erosivo	26
3.4.1.- Equação da continuidade do fluxo sólido	27
3.4.2.- Mecanismos de transporte e de deposição dos sedimentos	29
3.4.3.- Capacidade de transporte e escoamento superficial	31
3.4.4.- Interação entre a carga de sedimentos e a capacidade de transporte	34
3.5.- Estudos de erosão – Experimentos de laboratório	36
4.- Material e Métodos	39
4.1.- Introdução	39
Etapa I: Geração de sulcos de erosão, em meio coesivo, a partir da aplicação de vazões crescentes e sucessivas	41
4.2.- Instalações e equipamentos	41

	Página
a.- Canal de declividade variável	41
b.- Simulador de chuva	44
c.- Alimentação líquida e controle de vazão	44
d.- Rugosímetro	45
e.- Leitor ótico de rugosidade	46
4.3.- Solo	47
a.- Local de coleta	47
b.- Preparação do solo para os ensaios	48
c.- Caracterização sedimentométrica, física e química do solo colocado no canal	49
4.4.- Tratamentos e procedimento experimental	51
a.- Tratamentos	51
b.- Saturação do maciço de solo	51
c.- Avaliação da rugosidade superficial e distribuição dos sedimentos	52
d.- Preparo do ensaio	52
e.- Avaliação da velocidade superficial	53
f.- Profundidade do escoamento superficial	54
g.- Quantificação das taxas de desagregação do solo	54
h.- Quantificação das perdas de solo	55
i.- Diâmetro das partículas do material desagregado e transportado	55
j.- Características hidráulicas do escoamento em sulcos	56
Etapa II: Estudo do desenvolvimento de sulcos de erosão em meio coesivo ..	58
4.5.- Identificação das etapas de formação dos sulcos	58
4.6.- Identificação do tipo de transporte	60
4.7.- Identificação do tipo de partícula em transporte	60
5.- Resultados e Discussão	62
Etapa I: Geração de sulcos de erosão em meio coesivo, a partir da aplicação de Vazões sucessivas e alteração na declividade	62
5.1.- Comportamento dos parâmetros hidráulicos envolvidos na desagregação do maciço de solo, durante a passagem do escoamento superficial	63
5.1.1.- Temperatura da água e duração dos eventos	63
5.1.2.- Velocidade do escoamento superficial	64
5.1.3.- Altura de lâmina do escoamento	67
5.1.4.- Deformações observadas no maciço de solo	71
5.1.5.- Posição da linha de água e do fundo ao longo do talveg do(s) sulco(s)	78
a.- Declividade de 3,0%	78
b.- Declividade de 6,0%	80
c.- Declividade de 9,0%	82
5.1.6.- Características hidráulicas do escoamento	84
5.1.7.- Regimes de escoamento	86
5.1.8.- Resistência a passagem do escoamento	87
5.1.9.- Interação entre a perda de carga e o número de Reynolds	90

	Página
5.2.- Comportamento dos parâmetros hidrossedimentológicos durante a passagem do escoamento superficial	91
5.2.1.- Concentração instantânea de sedimentos	91
a.- Declividade de 3,0%	92
b.- Declividade de 6,0%	94
c.- Declividade de 9,0%	96
5.2.2.- Concentração acumulada de sedimentos ao longo do ensaio	99
5.2.3.- Concentração média de sedimentos do material retido na Cuba-I ..	102
5.2.4.- Curvas granulométricas do material coletado na Cuba-I	104
a.- Declividade de 3,0%	106
b.- Declividade de 6,0%	107
c.- Declividade de 9,0%	108
5.2.5.- Perda de solo	111
Etapa II: Estudo do desenvolvimento dos sulcos de erosão em meio coesivo	115
5.3.- Formação do(s) sulco(s)	115
5.3.1.- Parâmetros hidráulicos capazes de definir a formação de sulcos	116
5.3.2.- Dinâmica do processo de evolução dos sulcos	121
a.- Modalidades de transporte	121
b.- Contribuição relativa do material transportado via fundo e via suspensão	128
c.- Evolução espaço-temporal do(s) sulco(s)	133
5.3.4.- Síntese da evolução	135
5.3.5.- Carga de sedimento média em transporte	139
6.- Conclusões e Recomendações	144
7.- Referências Bibliográficas	148
8.- Anexos	
Anexo A.- Dados referentes à velocidade superficial e à altura de lâmina do escoamento obtidos no decorrer de cada um dos 15 eventos ensaiados no canal experimental para as três declividades de trabalho	A1
Anexo B.- Procedimento de cálculo da posição da linha de energia (I_e) e tabelas contendo parâmetros geométricos que caracterizam os sulcos de erosão e os parâmetros hidráulicos calculados a partir das informações levantadas durante e após cada um dos eventos realizados	B1
Anexo C.- Gráficos referentes às seções transversais dos sulcos de erosão que se desenvolveram na superfície do maciço de solo após a passagem das cinco vazões crescentes e sucessivas com o canal experimental colocado nas três declividades de trabalho ...	C1
Anexo D.- Dados referentes à concentração de partículas sólidas no escoamento obtidos no decorrer de cada um dos eventos ensaiados no canal experimental para as três declividades de trabalho	D1

Anexo E.- Definição, características e participação dos Latossolos no total dos solos brasileiros, distribuição geográfica dos Latossolos no estado do rio Grande do Sul e composição da fase sólida mineral do solo	E1
--	----

Relação de Tabelas

	Página
4.1. Síntese das atividades desenvolvidas durante as Etapas I e II, onde são descritas as atividades pré-evento, o local e o momento em que foi realizada a atividade ligada ao ensaio e o objetivo e/ou resultado da ação	40
4.2. Características físicas e químicas do solo coletado, no campo, em Passo Fundo para os ensaios e dos solos arenosos da Estação de Pesquisa da FEPAGRO (Santa Maria/RS) e Estação Agronômica da UFRGS (Eldorado do Sul/RS)	50
5.1. Variação da temperatura da água, durante a realização dos ensaios, avaliada com o termômetro colocado na Cuba-II	63
5.2. Variação da velocidade superficial do escoamento, durante a realização dos ensaios, avaliada através do uso de traçador	66
5.3. Vazão de incisão, intervalo de tempo para a incisão, seção e posição na superfície do maciço do ponto de incisão para cada uma das três declividades de trabalho	77
5.4. Alguns parâmetros característicos do escoamento superficial detalhados para cada uma das declividades do canal e para cada uma das vazões crescentes e sucessivas aplicadas sobre o maciço de solo, indicando a vazão de incisão	85
5.5. Variação na altura de lâmina (h), medida durante os ensaios, no número de Reynolds, no fator perda de carga de Darcy-Weissbach e no coeficiente de rugosidade de Manning para as condições estudadas, indicando a vazão de incisão	88
5.6. Quantidade de solo retida na Cuba-I e concentração média de sedimentos para cada um dos eventos simulados no canal de declividade variável, indicando a vazão de incisão	103
5.7. Diâmetros característicos do material desagregado e transportado pelo escoamento superficial e coletado diretamente na Cuba-I, indicando a vazão de incisão	105
5.8. Perda de solo total e parcial para cada um dos ensaios conduzidos no canal de declividade variável sob a ação de vazões crescentes e sucessivas e a indicação da vazão de incisão	111
5.9. Vazão de incisão, tensão e velocidade de cisalhamento, perda de solo e percentual da perda de solo para a vazão de incisão	117
5.10. Comparação entre os valores médios do d_{50} , do número de Reynolds, da tensão de cisalhamento e da descarga sólida antes e após a incisão de pelo menos um sulco de erosão, para as três declividades	118
5.11. Resumo das correlações encontradas entre os diferentes parâmetros hidráulicos testados e a perda de solo, na busca do melhor descritor da perda de solo	119

	Página
5.12. Resumo das correlações encontradas entre os diferentes parâmetros hidráulicos testados e a perda de solo, visando a separação das diferentes fases evolutivas do(s) sulco(s) de erosão	119
5.13. Descrição das informações necessárias para a aplicação do critério proposto por Raudkivi (1990) para identificar os diferentes tipos de transporte	122
5.14 Fases evolutivas dos sulcos de erosão associadas ao tipo de transporte de sedimentos e ao tipo de partícula que está sendo transportada em cada condição, para cada declividade do canal e vazão aplicada	125
5.15. Percentual de participação dos tipos de transporte (via suspensão e via fundo) no material total transportado pelo escoamento, após a aplicação de vazões crescentes, com o canal posicionado nas declividades de 3,0; 6,0 e 9,0%	128
5.16 Valores de potência do escoamento calculados para as diferentes faixas de evolução dos sulcos de erosão, em função das vazões crescentes e sucessivas aplicadas e da elevação da declividade do canal experimental	136
5.17. Correlações encontradas entre a carga média de sedimentos e a potência unitária do escoamento	140

Relação de Figuras

	Página
3.1. Forças envolvidas no processo de solapamento das paredes de um sulco de erosão em evolução	13
3.2. Representação gráfica das variáveis que caracterizam um escoamento	18
3.3. Diagrama de Shields adaptado por Mantz (1977)	24
3.4. Velocidade de cisalhamento crítica, em função do tamanho das partículas, em fluxo turbulento	25
3.5. Ilustração referente às interações entre a carga de sedimento, a desagregação, a deposição e a capacidade de transporte do fluxo. (A) Vista em planta. (B) Alterações nas taxas de desagregação e de transporte ao longo de um canal infinitamente longo	28
3.6. Ilustração que mostra os diversos caminhos que as partículas sólidas podem seguir a partir do momento em que são desagregadas e incorporadas ao escoamento superficial e alguns componentes do sistema	30
3.7. Deformações de fundo, possíveis de serem identificadas, no perfil longitudinal de um canal de fundo móvel	36
4.1. Ilustração do conjunto experimental planejado e construído e da plataforma de acesso para às avaliações e leituras durante cada evento, sendo: 1.- Canal de declividade variável; 2.- Medidor de vazão; 3.- Macaco hidráulico; 4.- Bomba; 5.- Tanque de alimentação para a saturação; e 6.- Reservatório	42
4.2. Ilustração mostrando a posição do maciço de solo no interior do canal de declividade variável, as duas cubas, a zona de transição e as diferentes seções de avaliação dos processos de erosão e deposição	42
4.3. Vista geral do canal de declividade variável, da posição do simulador de chuva, das demais instalações experimentais e detalhe da forma de fixação e conexão das mangueiras no fundo do canal	43
4.4. Reservatório e bomba que alimenta o modelo, sendo na imagem (a) o medidor eletromagnético de vazão e na imagem (b) o transmissor de dados	45
4.5. Sistema laser de medição de rugosidade superficial, em primeiro plano o sensor laser e ao fundo <i>laptop</i> , <i>datalogger</i> e fonte de energia	47
4.6. Curva granulométrica do solo colocado no interior do canal e que constituiu o maciço de solo submetido à ação das cinco vazões crescentes e sucessivas	50

5.1.	Síntese do comportamento da velocidade do escoamento superficial, durante os eventos onde foram aplicadas as cinco vazões crescentes, em função do tempo de duração de cada um dos ensaios com o canal colocado nas declividades de trabalho	65
5.2.	Comportamento da média das velocidades do escoamento superficial, conforme aumenta a vazão de alimentação do canal de declividade variável	67
5.3.	Altura de lâmina do escoamento superficial em função do tempo de duração de cada ensaio, para as cinco vazões, com o canal na declividade de 3,0%	68
5.4.	Altura de lâmina do escoamento superficial em função do tempo de duração de cada ensaio, para as cinco vazões, com o canal na declividade de 6,0%	69
5.5.	Altura de lâmina do escoamento superficial em função do tempo de duração de cada ensaio, para as cinco vazões, com o canal na declividade de 9,0%	70
5.6.	Deformação provocada pela passagem das cinco vazões sobre o maciço, logo após a chuva simulada, com o canal na declividade de 3,0%	73
5.7.	Deformação provocada pela passagem das cinco vazões sobre o maciço, logo após a chuva simulada, com o canal na declividade de 6,0%	75
5.8.	Deformação provocada pela passagem das cinco vazões sobre o maciço, logo após a chuva simulada, com o canal na declividade de 9,0%	76
5.9.	Oscilações da linha de água e do fundo ao longo do talveg, para as cinco vazões ensaiadas, com o canal colocado na declividade de 3,0%	79
5.10.	Oscilações da linha de água e do fundo ao longo do talveg, para as cinco vazões ensaiadas, com o canal colocado na declividade de 6,0%	81
5.11.	Oscilações da linha de água e do fundo ao longo do talveg, para as cinco vazões ensaiadas, com o canal colocado na declividade de 9,0%	83
5.12.	Regimes de escoamento na condição de fluxo estabilizado, para as diferentes vazões estdadas	86
5.13.	Separação dos regimes de escoamento em função da relação entre o fator perda de carga e o número de Reynolds do escoamento superficial	90
5.14.	Concentração instantânea de sedimentos no escoamento superficial no decorrer do ensaio, para as cinco vazões aplicadas sobre o maciço de solo, com o canal colocado na declividade de 3,0%	93

	Página
5.15. Concentração instantânea de sedimentos no escoamento superficial no decorrer do ensaio, para as cinco vazões aplicadas sobre o maciço de solo, com o canal colocado na declividade de 6,0%	95
5.16. Concentração instantânea de sedimentos no escoamento superficial no decorrer do ensaio, para as cinco vazões aplicadas sobre o maciço de solo, com o canal colocado na declividade de 9,0%	98
5.17. Evolução da concentração acumulada de sedimentos no escoamento superficial, para as três declividades, quando da aplicação das cinco vazões crescentes sobre o maciço de solo	100
5.18. Comportamento do diâmetro médio das partículas (d_{50}) do material coletado na Cuba-I após o final de cada um dos eventos simulados no canal, indicando as vazões de incisão	105
5.19. Curva granulométrica do material desagregado e transportado pelo escoamento superficial, para cada uma das vazões aplicadas sobre o maciço de solo, com o canal colocado na declividade de 3,0%	106
5.20. Curva granulométrica do material desagregado e transportado pelo escoamento superficial, para cada uma das vazões aplicadas sobre o maciço de solo, com o canal colocado na declividade de 6,0%	108
5.21. Curva granulométrica do material desagregado e transportado pelo escoamento superficial, para cada uma das vazões aplicadas sobre o maciço de solo, com o canal colocado na declividade de 9,0%	109
5.22. Comportamento da perda de solo, expressa na escala logarítmica, em função da aplicação de sucessivas vazões crescentes e do aumento da declividade do canal experimental, indicando a vazão de incisão	112
5.23. Relação entre a tensão de cisalhamento do escoamento e a perda de solo, para cada um dos eventos simulados no canal experimental	120
5.24. Imagem obtida junto da seção 3 do canal, imediatamente após a passagem das vazões de 25,5 (A), 38,5 (B) e 51,0L.min ⁻¹ (C), com o canal colocado na declividade de de 3,0%. Sendo que a tonalidade e o tamanho das setas indicam o caminho percorrido pelo fluxo de diferentes intensidades	123
5.25. Evolução da participação do transporte via suspensão e via fundo no total de material transportado pelo escoamento superficial para os eventos simulados nas três declividades.	130
5.26. Comportamento do diâmetro médio das partículas transportadas pelo escoamento superficial quando da passagem da vazão de 51,0L.min ⁻¹ , com o canal colocado na declividade de 6,0%	134
5.27. Síntese das faixas de evolução dos sulcos de erosão, a partir da relação entre a potência do escoamento e a perda de solo, para cada um dos eventos simulados no canal experimental	137

	Página
5.28. Visualização das fases evolutivas dos sulcos (1,2,3 e 4) e da quantidade de partículas sólidas, coletadas nos potes, antes do escoamento superficial alcançar o reservatório (A , B , C e D)	138
5.29. Relação entre a carga de sedimento média e a potência unitária do escoamento para os solos compredominância da fração areia e para o solo com predominância da fração argila	139

Relação de Símbolos e Abreviaturas

A	Área da seção	(m ²)
a	Coeficiente da equação 3.3	
b	Coeficiente da equação 3.3	
b	Largura do escoamento	(m)
BLD	Borda lateral direita do(s) sulco(s) de erosão	
BLE	Borda lateral esquerda do(s) sulco(s) de erosão	
C	Coesão do solo	(N.m ⁻²)
C ₁	Coeficiente da equação 3.15	
C _y	Concentração de sedimentos	(g.L ⁻¹)
d ₁₀	Diâmetro para o qual 10,0% do material são mais finos	(mm)
d ₅₀	Diâmetro para o qual 50,0% do material são mais finos	(mm)
d ₆₅	Diâmetro para o qual 65,0% do material são mais finos	(mm)
Di	Quantidade de sedimento gerada no entressulco	(kg.m ⁻² .s ⁻¹)
Dr	Taxa de desagregação nos sulcos	(kg.m ⁻² .s ⁻¹)
D _{rc}	Taxa máxima de erosão	(kg.m ⁻² .s ⁻¹)
Ec	Energia cinética	Joule
Ep	Energia potencial	Joule
f	Fator perda de carga de Darcy-Weisbach	
F	Número de Froude	
FT	Fator perda de carga de Darcy-Weisbach total	
Fg	Resistência de partícula	
Ff	Resistência de forma	
g	Aceleração da gravidade	(m.s ⁻²)
h	Altura de lâmina	(m)
H _c	Altura crítica	(m)
h ₁	Altura piezométrica no orifício de pressão total	(m)
h ₂	Altura piezométrica no orifício de pressão estática	(m)
m	Massa	(kg)
P ₁ /γ	Carga de pressão (altura piezométrica) na tomada de pressão total	(m)
P ₂ /γ	Carga de pressão (altura piezométrica) na tomada de pressão estática	(m)
Pm	Perímetro molhado	(m)
q	Descarga líquida	(m ³ .s ⁻¹)
q _s	Descarga sólida	(g.s ⁻¹)
Re	Número de Reynolds	
R*	Número de Reynolds do grão	
R _H	Raio hidráulico	(m)
S	Declividade	(m.m ⁻¹)
S ₁	Seção número I, dos 0,50 aos 1,00 m sobre o maciço de solo	
S ₂	Seção número II, dos 1,00 aos 1,50 m sobre o maciço de solo	
S ₃	Seção número III, dos 1,50 aos 2,00 m sobre o maciço de solo	
S ₄	Seção número IV, dos 2,00 aos 2,50 m sobre o maciço de solo	

S_5	Seção número V, dos 2,50 aos 3,00 cm sobre o maciço de solo	
S_6	Seção número VI, dos 3,00 aos 3,50 cm sobre o maciço de solo	
t	Tempo	(s)
T	Temperatura da água	(°C)
T_c	Capacidade de transporte do escoamento	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
T_r	Zona de transição existente na superfície do maciço de solo	
u	Velocidade do escoamento	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
u^*	Velocidade de cisalhamento das partículas	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
v	Velocidade	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
$v_1^2/2g$	Energia cinética (Taquicarga) na tomada de pressão total	(m)
$v_2^2/2g$	Energia cinética (Taquicarga) na tomada de pressão estática	(m)
y	Profundidade da fenda na superfície do solo	(m)
W	Peso do solo	(kg)
w	Velocidade de queda das partículas	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
x	Distância no declive	(m)
z_1	Energia potencial de posição em relação a um plano horizontal de referência, na tomada de pressão total	(m)
z_2	Energia potencial de posição em relação a um plano horizontal de referência, na tomada de pressão estática	(m)

Símbolos Gregos

γ_s	Peso específico do sedimento	($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$)
γ	Peso específico da água	($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$)
κ	Constante de von Karman	
δ	Espessura da sub-camada viscosa	(mm)
ν	Viscosidade cinemática	($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
ϕ	Ângulo de fricção interna	(°)
θ	Parâmetro de Shields	
ρ_w	Massa específica da água	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ_s	Massa específica das partículas sólidas	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ω	Potência unitária do escoamento	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
ω_{cr}	Potência unitária do escoamento crítica	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Ω	Potência do escoamento	($\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$)
τ	Tensão de cisalhamento do escoamento	($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)
τ_{cr}	Tensão de cisalhamento crítica	($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)
ψ	Força devido a Poro pressão	(N)

1.- Introdução

A principal causa da degradação do solo em ambientes tropicais e subtropicais úmidos é a erosão hídrica e as atividades que contribuem para a perda de solo. A erosão do solo é um dos mais difíceis problemas relacionados com os recursos naturais, a ser administrado em todo o mundo. Ela se constitui em fonte primária dos sedimentos capazes de poluir os cursos de água e causar assoreamento em reservatórios. Portanto, uma das preocupações dos profissionais que trabalham com a conservação dos recursos naturais e desejam a manutenção e/ou a melhoria da qualidade do solo e da água, é o impacto negativo provocado pelas fontes de poluição difusa, como por exemplo, a contaminação gerada pelo escoamento superficial oriundo das áreas agrícolas.

Os maiores tipos de erosão são a geológica e a antrópica. A erosão geológica inclui os processos de formação e erosão do solo, contribuindo para a sua distribuição na superfície da terra. A erosão induzida pela atividade humana, resultante da intervenção humana no ecossistema natural (remoção da vegetação natural), poderá provocar a quebra dos agregados, compactação, redução nas taxas de infiltração e remoção de partículas minerais e orgânicas.

Os dados de degradação dos solos no Brasil nas áreas agrícolas são alarmantes, sendo que, em diversos Estados a situação é grave. Segundo dados de Hernani *et al.* (2002), no início dos anos 90 no Brasil, eram perdidas 600 milhões de toneladas de solo agrícola devido ao manejo incorreto. As informações indicam que no Estado do Paraná, a perda de solo pode atingir entre 15,0 e 20,0t.ha⁻¹.ano⁻¹ (PARCHEN e BRAGAGNOLO, 1991) e que, no anos de 1982, cerca de 12,5 milhões de toneladas de sedimentos foram depositados no reservatório de Itaipu (DERPSCH *et al.*, 1991) ; que no Estado do Rio Grande do Sul a perda de solo poderia alcançar 40,0t.ha⁻¹.ano⁻¹, em seis milhões de hectares cultivadas (SCHMIDT, 1989) e, no Estado de São Paulo, 48,5 milhões de toneladas de sedimento chegam aos mananciais, causando assoreamento e poluição (BERTOLINI *et al.*, 1993).

O processo erosivo provocado pela ação do escoamento pode ser dividido em desagregação e transporte das partículas. Quando não há energia suficiente para continuar ocorrendo o transporte, ocorre a deposição do material transportado. A severidade do processo erosivo depende da quantidade de material disponível para ser desagregado e da capacidade dos agentes erosivos em transportá-lo. O processo erosivo é acelerado pela atividade agrícola, pecuária, reflorestamentos e construção civil. A maior ou menor gravidade do processo dependerá entre outros fatores, do tipo de solo, das suas propriedades físicas, da profundidade do perfil e da rugosidade superficial.

Para quantificar a carga de sedimentos gerados pelas diferentes atividades e para compreender o processo erosivo como um todo, é possível utilizar modelos de predição de erosão. Nas três últimas décadas na Europa e nos Estados Unidos diversos pesquisadores publicaram uma série de trabalhos que influenciaram a modelagem da erosão hídrica.

No seu modelo conceitual, Meyer *et al.* (1975) dividiram o processo em erosão em sulcos e entressulcos. A erosão em entressulco é aquela onde a desagregação é função da precipitação e a origem dos sedimentos é a superfície do solo. Na erosão em sulcos, o escoamento é o responsável tanto pela desagregação como pelo transporte dos sedimentos gerados.

Atualmente, nesta área de estudo, grande parte dos trabalhos desenvolvidos tem dedicado atenção para o estudo da erosão em sulcos e aos processos a ela relacionados, na tentativa de responder às seguintes questões: Quando inicia o sulco de erosão e quanto sedimento pode ser desagregado e transportado pelo escoamento concentrado nos sulcos?

As respostas para essas perguntas são importantes porque os modelos, ao separarem a erosão em sulcos e entressulcos, exigem o estabelecimento de critérios que permitam prever o início da formação de sulcos. Uma das formas que se pode utilizar para modelar o início de formação de sulcos é supor que existe uma tensão cisalhante e/ou uma velocidade de cisalhamento crítica que deve ser superada.

Na Europa, o transporte de material siltoso pelo escoamento superficial foi estudado por vários autores, mostrando que o tamanho médio do sedimento transportado pelo fluxo está relacionado com as características hidráulicas do escoamento (velocidade de cisalhamento, velocidade média, número de Froude e de Reynolds). Portanto, é possível pensar que a velocidade de cisalhamento possa ser um parâmetro capaz de indicar o início de formação de sulco em solos siltosos. Outro componente importante nesses tipo de estudo é o fator declividade, uma vez que, em uma revisão de literatura realizada por Selby (1994), é sugerido que a geração de sulcos somente ocorre com um gradiente de terreno superior a 5,0% e com número de Froude de 2,8 (sem chuva) e 2,3 (com chuva). Assim, este critério pode ser considerado como um limite mínimo para a formação de sulco.

O solo, por ser material coesivo e com superfície irregular, apresenta comportamento diferente daquele apresentado por sedimentos granulares do tipo areia (grãos individuais) afetando diretamente o poder erosivo do escoamento.

Na literatura, é possível encontrar os avanços alcançados na predição dos principais fatores que influenciam no processo de incisão de sulcos. Entretanto, faltam experimentos conduzidos em condições de solo, de clima e de manejo adotados no Brasil, para que as relações desenvolvidas em outros locais do mundo possam aqui ser avaliadas. Portanto, para

entender do processo de incisão de sulcos em solos brasileiros é fundamental que seja proposta, testada e validada uma metodologia e os equipamentos capazes de permitir a realização desse tipo trabalho para solos com alto teor de argila, como por exemplo, aqueles da região produtora de grãos do Estado do Rio Grande do Sul.

Entretanto, mesmo que a idéia seja interessante, uma pergunta ainda se impõe: em nosso meio existe uma metodologia, acessível e de custo relativamente baixo, que permita caracterizar as condições hidráulicas que regem o escoamento?

A proposta deste estudo é encontrar uma solução para este impasse, ou seja, buscar algumas respostas para estes questionamentos. Além disso, solidificar uma proposta de trabalho para o estudo de diferentes tipos de solo e para a inclusão de parâmetros da Hidráulica clássica e da Mecânica fluvial nos estudos de Mecânica da erosão hídrica.

Tendo como ponto de partida as idéias apresentadas até o presente momento, é possível formular as seguintes hipóteses de trabalho:

- *Os processos de desagregação e de transporte das partículas sólidas que constituem o maciço de solo se tornam mais intenso com o aumento da energia do fluxo. Portanto, a incisão dos sulcos e a concentração do escoamento superficial devem provocar aumento nos parâmetros sedimentométricos;*
- *Os parâmetros hidráulicos que caracterizam o escoamento superficial podem servir como referência para a caracterização das diferentes fases de evolução dos sulcos de erosão. Portanto, a partir da quantificação desses parâmetros será possível identificar valores críticos que permitirão separar as diferentes etapas de evolução dos sulcos de erosão em meio coesivo; e*
- *A caracterização do escoamento que incide sobre um meio deformável através sua da potência unitária é capaz de explicar não só a perda de solo, mas também de refletir o efeito da textura do solo sobre a perda total.*

A realização dos ensaios para a obtenção dos dados para testar as hipóteses formuladas envolveu diversas fases de trabalho, especialmente para resolver o problema da deficiência de infra-estrutura para a condução deste tipo de proposta. A primeira fase consistiu na concepção teórica e na construção do canal de declividade variável onde foram gerados os sulcos de erosão em solo argiloso, a partir do aumento da vazão e da declividade, depois foram realizados os testes de calibração dos diversos sistemas que estão ligados ao canal e, finalmente foram efetuados os ensaios que permitiram o levantamento das informações necessárias para a realização das duas Etapas I e II deste estudo.

2.- Objetivos

O objetivo geral do trabalho foi estabelecer valores limites para as condições hidráulicas que regem o momento da incisão dos sulcos e sua evolução em um maciço de solo argiloso (meio coesivo), quando o mesmo é submetido à ação de vazões crescentes e sucessivas e diferentes declividades do canal experimental.

Os objetivos específicos deste estudo referem-se à criação de condições experimentais para a geração dos sulcos, a observação de sua evolução e o registro dos parâmetros hidráulicos e sedimentométricos.

Quanto à implantação da metodologia, os objetivos específicos foram:

Construir, testar e adaptar uma metodologia que seja capaz de permitir o estabelecimento das condições hidráulicas que regem os escoamentos difuso e concentrado em meio coesivo.

Quanto à análise dos experimentos, nos propusemos a:

- a) Identificar as fases de escoamento difuso e concentrado, além de buscar identificar as condições da superfície do solo que podem favorecer a concentração do escoamento superficial;
- b) Estudar como ocorre a evolução e o desenvolvimento espacial e temporal dos sulcos de erosão a partir do momento em que o escoamento encontra um caminho preferencial e logo passa a ser canalizado;
- c) Quantificar e escolher parâmetros hidráulicos que possam oferecer informações sobre o motivo da alternância entre os processos erosivos e deposicionais que ocorrem nos eventos simulados no canal experimental;
- d) Estabelecer correlações entre a perda de solo gerada em sulcos já definidos em solo argiloso e aquela gerada em sulcos pré-formados em solos arenosos.

3.- REVISÃO BIBLIGRÁFICA

3.1.- Introdução

Após o início do escoamento superficial, a quantidade e a granulometria do material transportado aumentará conforme cresce a energia do fluxo. Caso ocorra uma redução na declividade, resultando em uma diminuição da velocidade e da capacidade de transporte, a partir desse local o material começará a se depositar.

A deposição do sedimento desagregado e em transporte deverá ocorrer quando a capacidade de transporte do fluxo se tornar menor do que a quantidade de partículas que estão presentes no fluxo (HUANG e NORTON, 2000). Essas partículas podem ser tanto aquelas que foram arrancadas do substrato e que voltaram a se depositar na superfície e, portanto, poderão ser resuspensas, como aquelas partículas que já estavam em trânsito no interior da massa líquida. Os agregados e as partículas de maior diâmetro serão aquelas que se depositarão mais rápido. As partículas menores serão levadas para locais mais distantes do seu ponto de origem, resultando no enriquecimento das frações mais finas. Portanto, a distribuição de tamanho do material erodido é muito importante quando se deseja quantificar os impactos negativos do processo erosivo, como por exemplo, a presença de contaminantes.

A capacidade de transporte do escoamento superficial poderá ser estimada em função das trocas de energia entre o fluxo e o contorno sólido, dos mecanismos de turbulência ou da tensão cisalhante, dependendo da concepção adotada (GARCIA, 1983). Qualquer fator capaz de reduzir a velocidade do escoamento provocará condições para que haja deposição. Portanto, barreiras físicas, tais como cordões vegetados, terraços ou mesmo estruturas de concreto, são capazes de reduzir a velocidade do escoamento e com isso aumentar o processo de deposição.

A partir do momento em que a chuva incidente sobre a superfície do solo, é capaz de superar a taxa de infiltração de água no solo, é possível se iniciar o processo de desagregação das partículas do solo, pela ação do escoamento superficial. O aumento na energia do fluxo faz com que a tensão de cisalhamento crítica seja atingida e superada dando início, desta forma, às diferentes etapas do processo erosivo.

3.2.- Erosão hídrica

A erosão do solo envolve três etapas interdependentes: a desagregação, o transporte e a conseqüente deposição das partículas (MEYER e WISCHMEIER, 1969). O solo é desagregado tanto pelo impacto das gotas de chuva como pela tensão de cisalhamento provocada pela passagem do escoamento superficial. O sedimento é transportado, na direção

do declive, pela ação do escoamento superficial, embora exista uma parte menor que é transportada pelo salpico.

3.2.1.- Conceituação

A erosão hídrica consiste na desagregação e no transporte das partículas do solo pela ação direta da chuva ou através do escoamento canalizado. As gotas da chuva quebram e desagregam as partículas, reduzindo as taxas de infiltração, devido à obstrução dos poros e provocando aumento no escoamento superficial e na quantidade de sedimento transportado. Além disso, o impacto das gotas sobre uma lâmina de água pouco espessa, produz aumento da turbulência e, com isso, aumento na capacidade do fluxo em desagregar e transportar o sedimento.

A energia disponível para a erosão apresenta-se sob duas formas: cinética e potencial. A energia potencial (**Ep**) resulta da diferença de altura de um corpo em relação a outro, podendo ser expressa pelo produto da massa (*m*), diferença de altura (*h*) e aceleração da gravidade (*g*). A energia potencial capaz de produzir erosão é convertida em energia cinética (**Ec**). A expressão que descreve a energia cinética, relaciona a massa (*m*) e a velocidade (*V*) do agente erosivo. Portanto, temos:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \qquad E_c = \frac{m \cdot V^2}{2} \qquad [3.1] \text{ e } [3.2]$$

A maior parte desta energia é dissipada pelo cisalhamento que ocorre entre o agente erosivo e a superfície sobre a qual ocorre o deslocamento, sendo que apenas 3,0 a 4,0% da energia do escoamento e 0,20% da energia de queda das gotas de chuva é gasta com o processo erosivo propriamente dito (PEARCE, 1976).

A determinação do potencial erosivo depende, principalmente, dos parâmetros de erosividade e também das características das gotas de chuva, as quais variam no tempo e no espaço. É bom ressaltar que o vento pode afetar a erosividade, especialmente se a chuva for atingida por ventos violentos (HADLEY *et al.*, 1985; XIAOQING, 2003).

A capacidade de uma chuva desagregar um maior número de partículas pode ser expressa em termos do tamanho das gotas, da intensidade, da energia cinética e da quantidade de movimento (HADLEY *et al.*, 1985). Portanto, existe uma grande variedade de parâmetros que podem ser utilizados para medir a erosividade da chuva. O problema central é escolher um parâmetro que seja o mais adequado para a maioria dos casos, em especial porque os ambientes apresentam características particulares e cada chuva é única, tanto nas escalas

temporal como espacial e, conseqüentemente, a resposta erosiva irá variar de diferentes formas.

Entre os diversos parâmetros, podem ser destacados: o total de precipitação, a intensidade da chuva e a energia cinética (**Ec**). O emprego de cada um desses fatores apresenta vantagens e desvantagens, mas a grande maioria dos autores tem utilizado a energia cinética, por concluírem que esse parâmetro responde melhor quando o objetivo é prever a perda de solo (WISCHMEIER e SMITH, 1958; YOUNG e WIERSMA, 1973; GUERRA, 1998).

A energia cinética determina a erosividade, que é a capacidade potencial da chuva em causar erosão (WISCHMEIER e SMITH, 1958). O índice EI_{30} é uma das maneiras de se expressar a erosividade das chuvas. Este índice expressa o produto da energia cinética total da chuva pela intensidade máxima (mm.h^{-1}) calculada para uma duração de 30 minutos.

3.2.2.- Desenvolvimento do processo erosivo

O estudo do processo erosivo, produzido pela ação da água, envolve a quantificação da perda de solo gerada, por exemplo, nas diferentes atividades agrícolas em um determinado período de tempo. A busca deste objetivo envolve desde a avaliação, o mais preciso possível, do papel da desagregação até a descrição da forma de propagação do sedimento sobre a superfície do solo. Portanto, o fundamental é compreender como se dá a dinâmica do transporte do material que foi desagregado.

Uma das alternativas para avançar nesse tipo de estudo, que envolve tanto a degradação como a contaminação dos cursos d'água, é o uso dos modelos de previsão de perdas por erosão. Nas três últimas décadas, os estudos desenvolvidos por vários pesquisadores ajudaram a lançar as bases para o desenvolvimento dos trabalhos que envolvem a desagregação, transporte e deposição das partículas de solo.

Entre estes estudos estão aqueles produzidos pelo grupo de pesquisa onde estavam inseridos Foster e Meyer (MEYER e WISCHMEIER, 1969; FOSTER e MEYER, 1972a; FOSTER e MEYER, 1972b; FOSTER e MEYER, 1975; FOSTER, 1982; FOSTER *et al.*, 1984a; FOSTER *et al.*, 1984b), que influenciaram na concepção e no desenvolvimento dos diversos modelos com base física, que estão em uso para quantificar as perdas provocadas pela erosão hídrica, entre os quais o modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*). No seu modelo conceitual, os referidos autores, dividiram o processo erosivo em duas etapas distintas e complementares: entressulcos e sulcos (MEYER *et al.*, 1975).

No passado, o que se chama hoje de erosão em entressulcos era considerado como a remoção uniforme do solo em finas camadas, na direção do declive, em função do

escoamento superficial. Entretanto, os primeiros estudos já demonstraram que esta forma idealizada de erosão raramente ocorre (SCHWAB *et al.*, 1996).

Entressulcos são zonas existentes entre os sulcos. A erosão em entressulcos ocorre, principalmente, devido ao impacto das gotas de chuva, ou seja, é função do tamanho, da massa e da velocidade de impacto da gota de chuva; além disso, é importante considerar a espessura de lâmina de água que está sobre a superfície (FOSTER, 1982).

Portanto, essa fase do processo depende mais da componente grau do declive do que do seu comprimento. Durante a chuva, quase que simultaneamente ao início da desagregação das partículas do solo, surge o primeiro microssulco. A maior ou menor capacidade do escoamento superficial de desagregar e transportar o sedimento é função da intensidade da chuva, da taxa de infiltração, da declividade e das propriedades do solo. A erosão em entressulcos envolve a combinação entre os efeitos do impacto da gota de chuva e do escoamento raso.

A erosão em sulcos consiste na desagregação e o transporte de solo pelo fluxo concentrado (BRYAN, 1987; RAUWS e GOVERS, 1988). Os sulcos são canais pequenos o suficiente para serem removidos pelas operações normais de preparo de solo, com aproximadamente 100 a 300mm de largura e 50 a 150mm de profundidade, uniformemente distribuídos no sentido do declive (FOSTER *et al.*, 1985). De acordo com Torri *et al.* (1987), os sulcos podem apresentar de 10,0 a 20,0mm de largura, 5,0mm de profundidade e no mínimo 50,0mm de comprimento. Nota-se que existe uma certa divergência entre as dimensões que caracterizam os sulcos, cuja origem poderia ser explicada pelo tipo de material/solo estudado, pela faixa de vazão/chuva imposta e pela topografia do meio.

A erosão em sulcos tem seu início quando o fluxo começa a se concentrar em determinados pontos na superfície do solo. Os caminhos preferenciais podem se formar a partir das marcas já existentes na superfície do solo, ou seja, em função das alterações na rugosidade superficial provocada pelas operações de preparo de solo, por exemplo. Nestes locais, é necessário que a declividade seja suficiente para permitir a incisão do microssulco. Os sulcos tenderão a se formar novamente no mesmo lugar, a menos que ocorra uma mudança drástica na rugosidade superficial.

Os experimentos conduzidos para determinar em que condições ocorrem o início dos sulcos têm produzido uma série de resultados para diferentes condições, tais como: tipos de solo, ou seja, mudança na resistência à desagregação, intensidade de chuva, duração do experimento, variação no ângulo e no comprimento do declive, alteração da cobertura vegetal e do teor de matéria orgânica do solo. De acordo com Selby (1994), os resultados encontrados indicam que o início de um sulco de erosão pode ocorrer em fluxo super-crítico, ou seja,

número de Froude maior do 1,0. Em condições de presença de chuva, o valor do número de Froude chegou a 2,3 e na ausência de chuva, chegou a 2,8.

A desagregação nos sulcos ocorre devido à força de cisalhamento do fluxo canalizado, especialmente no ponto de incisão e depois contra as paredes do sulco de erosão em formação. O crescimento e a propagação do sulco no sentido do declive deve-se a magnitude do escoamento que nele ocorre, ao colapso das paredes do próprio sulco e à liquefação do fundo e das paredes e ao excesso de capacidade de transporte do fluxo concentrado no sulco. Normalmente, essa associação de processos é mais comum em declives superiores a 2,0 ou 3,0% (BRYAN e POESEN, 1989).

Além disso, a erosão em sulcos é fortemente dependente tanto do grau quanto do comprimento de declive, uma vez que a erosão em sulcos resulta da ação das forças de cisalhamento do fluxo concentrado, do aumento da espessura de lâmina do escoamento e da sua velocidade (TORRI *et al.*, 1987).

Desde a década passada, se procura avaliar a degradação do solo via erosão hídrica de uma forma mais ampla, com o objetivo de prever algo mais que a perda total de solo. Portanto, é necessário perceber que não estão envolvidos no problema apenas aspectos relacionados com a desagregação e o transporte de partículas nas áreas de entressulcos e de sulcos. Também, está presente a preocupação com a contaminação dos cursos de água via poluição difusa, ou seja, através dos fertilizantes e dos agroquímicos que possam estar dissolvidos na água ou adsorvidos ao sedimento transportado pelo escoamento.

A preocupação com a contaminação provocada pela poluição difusa foi um dos motivos que levou diversos pesquisadores europeus a desenvolverem o modelo EuroSEM (MORGAN, *et al.*, 1998). Esta é uma ferramenta capaz de mapear as fontes potenciais de sedimentos e permite que os gestores públicos (tomadores de decisão) tenham a possibilidade de montar estratégias eficientes para atacar os pontos críticos e, com isso, reduzir a contaminação dos cursos de água.

Com o uso do modelo EuroSEM é possível prever se a largura dos sulcos sofre algum tipo de alteração conforme o sulco avança na direção do declive e/ou se ocorrem variações na profundidade do sulco, à medida que os processos de erosão e deposição estão se intercalando, ou seja, a deposição faz com que a profundidade diminua e a erosão faz com que aumentem tanto a largura como a profundidade dos sulcos, através da retirada de material tanto das paredes laterais como do fundo do sulco (MORGAN *et al.*, 1998).

O trabalho conduzido por Favis-Mortlock *et al.* (2001), que permitiu o desenvolvimento do modelo RILLGROW, parte do princípio da não separação do processo erosivo em sulco e entressulcos. O modelo EuroSEM, diferentemente do modelo WEPP

(NEARING *et al.*, 1989) e acompanhando a linha de trabalho de Favis-Mortlock *et al.* (2001), também assume o mesmo princípio, ou seja, não separa a erosão em entressulco e em sulco (MORGAN *et al.*, 1998). Neste modelo as áreas de entressulcos são consideradas aquelas onde não existe uma rugosidade superficial orientada. Os sulcos são aqueles locais onde o escoamento está concentrado em canais. É assumido como pressuposto pelo modelo que o material desagregado nas áreas de entressulco alimentará os sulcos; além disso, o modelo admite que o formato dos canais é trapezoidal.

Dentro de uma visão mais abrangente, como os sulcos de erosão estão presentes não somente nas áreas onde existe atividade agrícola, é necessário pensar em uma definição mais geral do que aquela proposta pela FAO, na qual os sulcos são definidos como microcanais que podem ser removidos pelas operações normais de preparo de solo.

Dentro desta nova idéia, é possível definir os sulcos de erosão como sendo canais com seção transversal de poucos centímetros, descontínuos, que podem ou não ter conexão direta com a rede de sulcos de uma determinada área. Além disso, podem desaparecer entre uma chuva e outra ou mesmo durante uma mesma chuva, caso a quantidade de material oriundo da área de entressulco seja grande o suficiente para preencher o sulco em formação.

3.2.3.- Incisão e aprofundamento dos sulcos de erosão

A incisão e o posterior aprofundamento do(s) sulco(s) são fases críticas do processo erosivo, uma vez que estas etapas estão freqüentemente associadas a um rápido aumento na concentração de sedimentos no escoamento. Após já estarem estabelecidos os sulcos tendem a evoluir através dos "knickpoints" (pontos de ruptura) e do processo de erosão regressiva.

Alguns desses pontos de ruptura podem ser destruídos, à medida que os sulcos em evolução se bifurcam, enquanto outros pontos poderão permanecer criando obstáculos que serão solapados pelo escoamento, sendo que deverá ser a partir desses pontos que o processo erosivo começa a se desenvolver. De acordo com Bryan (1990), as alterações na declividade do fundo do sulco ocorrem como uma resposta às condições hidráulicas que se estabelecem durante o processo evolutivo desses sulcos. Entretanto, a rapidez com a qual estas alterações se processam dificulta a quantificação das características hidráulicas do fluxo e, portanto, a identificação das condições iniciais de sua formação.

O desenvolvimento e o crescimento de um sulco ocorre em função do potencial de desagregação do próprio sulco, da capacidade de transporte do escoamento, da carga de sedimentos e da interação entre estes fatores. Para discutir o potencial de desagregação do sulco serão abordados os processos de incisão, erosão regressiva e desagregação das paredes do sulco.

A resistência que o solo oferece à ação de um escoamento pode ser medida através da tensão cisalhamento crítica (força tratora crítica), ou seja, a mínima tensão que deve agir sobre ele para que as partículas entrem em movimento. A incisão irá ocorrer a partir do momento em que a tensão de cisalhamento do escoamento superar a força tratora crítica do solo. A taxa de solo desagregado, em sulco, devido ao processo de incisão, varia de acordo com a força de cisalhamento que excede esta força tratora crítica, sendo expressa por (FOSTER, 1982):

$$D_{rc} = a \cdot (\tau - \tau_c)^b \quad [3.3]$$

onde: D_{rc} é máxima taxa de desagregação em sulcos (potencial); τ tensão de cisalhamento do fluxo ao longo do sulco; τ_c é a tensão de cisalhamento crítica necessária para desagregar as partículas de solo e a e b são constantes. Sendo que a constante b é suposta como variando entre 1,0 e 1,1 (FOSTER, 1982).

A tensão de cisalhamento média que age sobre o fundo de um canal (τ), para um fluxo uniforme é dada por:

$$\tau = \gamma \cdot R_H \cdot S \quad [3.4]$$

onde: γ é o peso específico da água, R_H é o raio hidráulico e S é a declividade do sulco.

A distribuição da tensão de cisalhamento no contorno de um sulco de erosão é desuniforme e, portanto, o uso de um valor médio para expressar a tensão cisalhante, no momento de se estimar o potencial de desagregação, poderá resultar em um erro de estimativa da quantidade de material a ser desagregado (HAAN, *et al.*, 1994).

Ao analisar-se a distribuição de tensões, é importante lembrar da geometria dos sulcos, pois é através dela que será possível compreender a forma pela qual um determinado sulco irá crescer e se desenvolver. Este avanço, em primeiro lugar, será resultado da forma como se dá a distribuição da tensão de cisalhamento nos limites do sulco. Antes de atingir uma camada não erodível, a forma do sulco pode ser aproximada através de diversas figuras planas entre as quais: o triângulo, como nos experimentos de campo realizados por Giasson e Cassol (1996) e por Braida e Cassol (1996); o trapézio, como no modelo EUROSEM (MORGAN *et al.*, 1998) ou, ainda, o retângulo como no modelo WEPP (FAVIS-MORTLOCK *et al.*, 2001).

No estudo conduzido por Reichert *et al.* (2001) em solo de textura arenosa, com o objetivo de avaliar o efeito das parcelas de erosão com seções transversais da superfície do solo retangular (STR) e triangular (STT), os resultados experimentais demonstraram que tanto para os parâmetros erodibilidade do solo em entressulcos e sulcos como para a tensão de

cisalhamento não houve diferença estatística significativa em função dos formatos das parcelas experimentais STR e STT.

Em se tratando de material coesivo, a tensão crítica de cisalhamento tem sido relacionada com diversas propriedades do solo, entre as quais: a coesão, a umidade, o percentual de argila, o diâmetro médio das partículas, o teor de matéria orgânica, a capacidade de troca de cátions (CTC) e o índice de plasticidade (ALBERTS *et al.*, 1995). A tensão crítica de cisalhamento de acordo com Foster e Meyer (1975), poderá variar entre 1,0 e 30,0Pa. Entretanto, para o caso de solos agrícolas, os referidos autores sugerem um valor médio para a tensão de cisalhamento crítica da ordem de 2,40Pa.

O solapamento e a erosão regressiva são os dois principais mecanismos pelos quais os sulcos se propagam na direção do declive. O solapamento resulta da ação das forças gravitacionais, das características hidráulicas do escoamento e da combinação destes dois fatores (HAAN *et al.*, 1994).

O solapamento é uma das componentes do processo de erosão em sulcos que pode ser avaliada a partir dos princípios da mecânica e da física dos solos (HIRSCHI e BARFIELD, 1988). No caso de solos com baixa coesão, com alta taxa de infiltração e com a presença de microsulcos já formados anteriormente, o solapamento pode ser o principal fator capaz de gerar e de fazer com que os sulcos de erosão evoluam rapidamente.

Na Figura 3.1., estão apresentadas, de forma esquemática, as forças envolvidas no processo de solapamento das paredes de um sulco de erosão (ELLIOT, 1988). Onde **H** é a altura crítica; caso **H** seja superada, haverá o processo de solapamento. As forças ativas envolvidas no solapamento do sulco são o peso de uma parcela de solo (**W**) e qualquer pressão positiva nos poros ao longo no plano de fratura. As forças de resistência serão a própria resistência do solo ao longo do plano de fratura, $F \sin(\phi)$, a coesão (**C**) e a pressão negativa nos poros (**ψ**).

Já o processo de erosão regressiva varia com a declividade e com algumas propriedades do próprio solo, como por exemplo, a coesão, a densidade, o índice de vazios, o teor de umidade, entre outros. Bradford *et al.* (1973) trabalhando com um modelo capaz de avaliar a estabilidade das paredes durante o desenvolvimento de voçorocas, identificaram que os fatores que controlam a estabilidade das paredes laterais das mesmas são a altura do lençol freático, a coesão do solo e a taxa de exfiltração.

A evolução dos sulcos através de erosão regressiva pode contribuir com grandes quantidades de sedimento. O processo consiste em uma destruição abrupta do perfil longitudinal do canal, ocorrendo a transição entre o fluxo raso e o fluxo com maior espessura

de lâmina. Em um mesmo canal, poderão existir vários locais com condições para a existência de erosão regressiva.

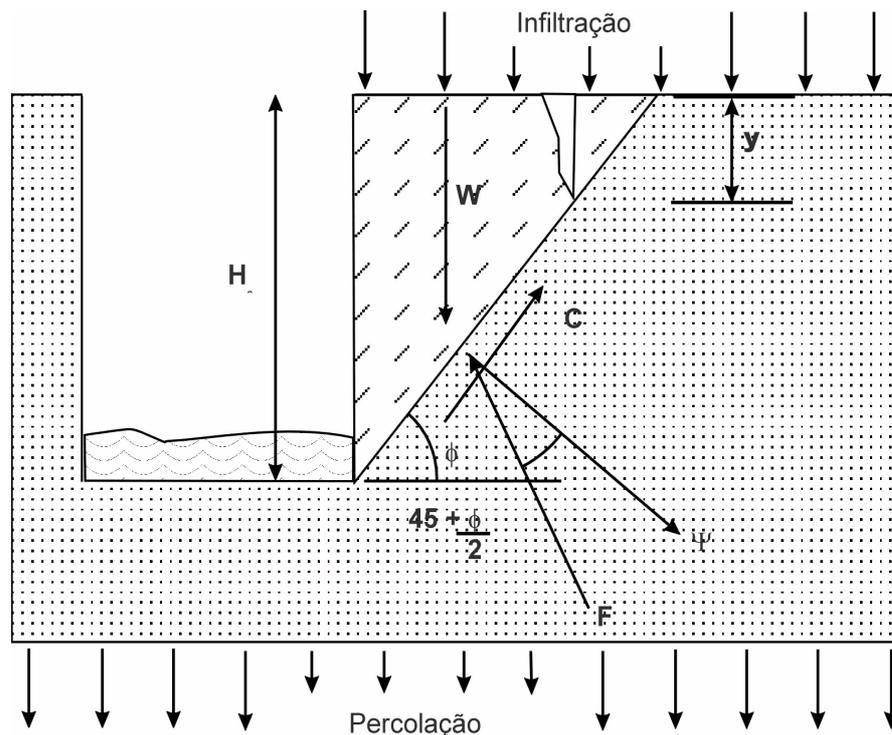


Figura 3.1. – Forças envolvidas no processo de solapamento das paredes de um sulco de erosão em evolução.

Fonte: Elliot, W.J. (1988).

3.2.4.- Rede de sulcos

O entendimento do processo erosivo dependerá do estudo de como se forma um sulco individualmente e, também, de como ocorre a evolução da rede de sulcos de erosão na superfície do solo. A rede de sulcos tem o seu início em um solo descoberto, a partir do momento em que o fluxo se concentra nos canais criados em função da rugosidade superficial. No início, os canais tendem a ser paralelos, mas com o passar do tempo, o fluxo vai se concentrando e gerando canais que formam ângulos entre si, os quais em função da declividade da linha de água podem se conectar formando uma rede de sulcos.

A densidade de sulcos (número de sulcos por unidade de largura) sofre alteração em função do grau e comprimento do declive, da descarga líquida, da textura do solo, da erodibilidade do solo e da presença ou da ausência de chuva (MEYER e MONKE, 1965). Em solos altamente erodíveis, a densidade de sulcos é alta e estes apresentam praticamente as mesmas dimensões do início até o final. Entretanto, em solos menos erodíveis, existe um número menor de sulcos, os quais apresentam diferentes larguras e profundidades, indicando que a desagregação e o transporte de partículas foi menos intenso, em função das características do próprio solo (textura, estrutura), do tipo de manejo utilizado ou dos fatores climáticos e ambientais.

Os efeitos da densidade de sulcos no processo erosivo não estão bem claros. Usando o modelo KYERMO, Hirschi e Barfield (1988) realizaram uma análise detalhada da relação entre o número de sulcos por parcela experimental e encontraram que a máxima produção de sedimentos ocorreu quando existiam seis sulcos em, aproximadamente, 4,50m. A justificativa utilizada pelos autores, para o declínio na quantidade de sedimento gerado quando o número de sulco é elevado, foi a baixa taxa de fluxo em cada sulco e a distribuição do escoamento superficial em um número maior de sulcos.

3.3.- Base hidrossedimentológica da erosão

O ciclo hidrológico é de importância fundamental para o processo erosivo, uma vez que a água da chuva poderá ser interceptada pela vegetação, evaporar, infiltrar-se no solo ou ficar retida nas irregularidades da superfície do solo. Além disso, é a partir da intervenção humana nas diferentes fases que o compõem que se inicia o processo de desagregação do solo, de transporte de partículas e dos poluentes que afetarão a qualidade da água oferecida às populações rurais e urbanas.

3.3.1.- Geração do escoamento superficial

Além do ciclo hidrológico é importante considerar como parte integrante do processo erosivo, o ciclo hidrossedimentológico. Os dois ciclos estão associados: paralelamente ao ciclo hidrológico, existe este outro ciclo aberto e dependente do ciclo da água que envolve o deslocamento, o transporte e o depósito das partículas sólidas presentes na superfície do solo (BORDAS e SEMMELMANN, 1997). Nas regiões tropicais e subtropicais onde o regime de chuvas é mais intenso é de se esperar que o desequilíbrio no ciclo hidrossedimentológico tenha conseqüências potencialmente mais prejudiciais.

O ciclo hidrológico compreende o transporte da água evaporada do mar para a terra, sua precipitação e drenagem em direção aos oceanos. Uma parcela dessa chuva poderá incidir diretamente sobre a superfície do solo e outra parte dessa água poderá ser interceptada pela cobertura vegetal existente na superfície do solo diminuindo a sua energia potencial. A água que chega até a superfície do solo é que irá desencadear o processo de desagregação.

Após chegar até a superfície do solo, a água poderá percorrer diversos caminhos: o primeiro é o salpico, posteriormente poderá infiltrar, depois terá a possibilidade de ficar detida nas irregularidades da superfície do terreno, formando poças que eventualmente poderão dar início ao escoamento superficial.

A infiltração contribuiu para o armazenamento de água no solo. Portanto, é um processo que depende da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da

superfície e das quantidades de água e ar inicialmente presentes no seu interior. Enquanto houver aporte de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade, sendo a superfície, naturalmente, o primeiro nível a saturar. Assim, a infiltração exerce um importante controle na geração do escoamento superficial. Quando a umidade do solo aumenta, a resistência ao cisalhamento diminui. Morgan (1996) descreve que à medida que a umidade do solo aumenta, este acaba atingindo o seu limite de liquidez e pode começar a fluir.

A retenção superficial é um estágio que antecede ao escoamento superficial. Entretanto, para que ocorra a retenção, é preciso que as condições da superfície do solo promovam a concentração de água nas irregularidades do terreno, as quais podem apresentar desde 1,0 a 2,0mm de profundidade, chegando a alcançar até alguns centímetros. O processo de armazenamento da água nas depressões será influenciado diretamente pelas propriedades do solo, pelas características das chuvas, pelo tipo de cobertura vegetal, pelo uso e manejo do solo, e pela microtopografia do terreno.

Se, por um lado, as irregularidades do terreno podem retardar o processo de escoamento superficial, armazenando água nessas depressões, por outro lado, uma vez rompidas essas irregularidades, através do acúmulo de água, podem dar início a processos rápidos de formação de sulcos na superfície do solo. Além disso, na determinação da capacidade de retenção superficial de uma determinada área, devem ser considerados alguns aspectos relacionados às propriedades físicas do solo e a macrotopografia do local (a forma, a declividade do terreno e o comprimento de rampa).

À medida que a água infiltra no solo e começa a saturá-lo, poças se formam na superfície, podendo iniciar o escoamento superficial. Na visão de Horton (1945), os processos de escoamento superficial e da formação de sulcos estão relacionados aos conceitos de infiltração e de geração de escoamento. O pesquisador atribui a remoção inicial de partículas pelo fluxo superficial à força de cisalhamento exercida pelo escoamento, à medida que o fluxo aumenta sua profundidade, encosta abaixo.

3.3.2.- Escoamento difuso e concentrado

A água que se acumula nas depressões começa a descer no sentido do declive quando o solo está saturado e as poças não conseguem mais reter essa água. No princípio o fluxo é difuso. De acordo com Horton (1945), a força de cisalhamento imposta por esse fluxo ainda não é suficiente para transportar partículas, mas, à medida que o fluxo aumenta e acelera, ocorre o cisalhamento das partículas do solo e, finalmente, o processo é desencadeado a partir de uma distância crítica.

Neste estágio, o processo erosivo tem seu início a partir de uma pequena incisão no solo, em especial onde o fluxo de água começa a se concentrar, podendo desta forma criar as condições para o início da formação de um sulco.

Assume-se que, na prática, o conceito teórico de evolução de sulcos possa ser representado por uma sucessão de etapas: escoamento difuso, incisão, escoamento concentrado e, por fim, a fase de sulco definido. Portanto, à medida que o fluxo se torna concentrado em pequenos canais, por exemplo, em pontos aleatórios da encosta, a profundidade do fluxo aumenta e a velocidade diminui devido ao aumento da rugosidade e há uma queda simultânea da energia do fluxo, causada pelo movimento de partículas que são transportadas por esses pequenos canais que estão se formando e que serão o embrião dos futuros sulcos (SLATTERY e BRYAN, 1991).

O escoamento difuso, o primeiro estágio do processo erosivo, compreende um fluxo mais ou menos regular, que avança por uma superfície com poucas irregularidades. Segundo Merrit (1984), a concentração de sedimentos e a velocidade das partículas vão aumentando à medida que o fluxo avança, ao mesmo tempo que o processo erosivo vai se estabelecendo. Apesar disso, neste estágio a erosão é ainda incipiente, muito localizada e envolve apenas o transporte de grãos individuais, ou seja, uma vez detectado o processo erosivo nesse estágio, ainda há grandes possibilidades de se recuperar a área atingida.

O escoamento começa a se concentrar quando a precipitação excede a capacidade de infiltração de água no solo, iniciando-se o escoamento superficial. A água acumula-se nas depressões (microtopografia) na superfície do solo, até que começa a descer a encosta na forma de um escoamento difuso, que poderá evoluir para um sulco (GUERRA, 1999). No avanço do processo, o fluxo que era difuso, evolui para os microcanais e, dependendo das condições da superfície do solo, pode ocorrer o desenvolvimento de bifurcações, por exemplo, através alterações na declividade.

O desenvolvimento de microcanais é o estágio seguinte da evolução do processo de formação dos sulcos de erosão. Nesse caso, a maior parte da água que escoar na superfície está concentrada em canais bem definidos, embora ainda sejam pequenos. Nos microcanais onde existe a erosão regressiva, a turbulência do fluxo aumenta bastante, uma vez que já existem no fundo dos microcanais algumas ondulações ou rugosidades (MERRITT, 1984). As rugosidades existentes no interior dos microcanais, resultantes dos processos de deposição ou da retirada de partículas mais finas tendem a se ampliar com o passar do tempo e gerar mais turbulência. O aumento da turbulência faz com que o fluxo se torne mais instável, acelerando o processo erosivo no interior dos microcanais.

3.3.3.- Características hidráulicas do escoamento superficial

O regime do escoamento gerado superficialmente pode ser descrito, globalmente, pelos seus números de Reynolds (R_e) e de Froude (F), apresentados a seguir:

$$R_e = \frac{V \cdot R_H}{\nu} \quad F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \quad [3.5] \text{ e } [3.6]$$

onde: V é a velocidade; R_H é o raio hidráulico do escoamento que, para o escoamento superficial, é tomado como sendo a espessura de lâmina e ν é a viscosidade cinemática da água.

O número de Reynolds (R_e) é a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas do fluxo (CHOW, 1959). Quanto maior a turbulência, maior será a capacidade de gerar erosão do fluxo. Em termos numéricos, se menor do que 500, o fluxo é laminar, e se acima de 2000 o fluxo é turbulento. Os valores intermediários indicam uma fase de transição ou fluxo perturbado, muitas vezes em função da turbulência transferida ao fluxo laminar pelo impacto das gotas de chuva. A maioria dos valores encontrados para o número de Reynolds, em trabalhos realizados no campo na Inglaterra, oscilaram entre 40 e 75, e entre 800 e 1400 em estudos conduzidos em áreas desérticas do estado do Arizona, nos Estados Unidos (ABRAHAMS *et al.*, 1986; MORGAN, 1996).

O número de Froude (F) descreve a relação entre as forças de inércia do fluxo e as forças de gravidade (CHOW, 1959). Quando o número de Froude é menor do que 1,0, predominam as forças gravitacionais e o fluxo é dito tranqüilo (lento) ou subcrítico. O número de Froude maior do que 1,0 indica fluxo rápido ou supercrítico, onde predominam as forças de inércia, tornando-o mais erosivo. Em trabalho realizado por Pearce (1976), os valores do F para escoamento superficial variaram entre 0,05 e 0,13.

As variáveis que descrevem o escoamento superficial são apresentadas na Figura 3.2.. De acordo com Julien e Simons (1985), as principais variáveis geométricas são o comprimento do canal (L) e o gradiente de declive (S). As demais variáveis envolvidas são: a intensidade da chuva (I), a profundidade de lâmina do escoamento (h), o perfil de velocidades (u), a descarga líquida (q), a descarga sólida (q_s) e a espessura da sub-camada viscosa (δ).

Além dos parâmetros já referidos, outro parâmetro a considerar é a tensão de cisalhamento (τ) que atua na interface existente entre o escoamento superficial e o contorno sólido (paredes laterais e o fundo do sulco). As propriedades físicas que caracterizam o fluido são o coeficiente de viscosidade dinâmica (μ), a viscosidade cinemática (ν), o peso específico (γ) e a massa específica da água (ρ).

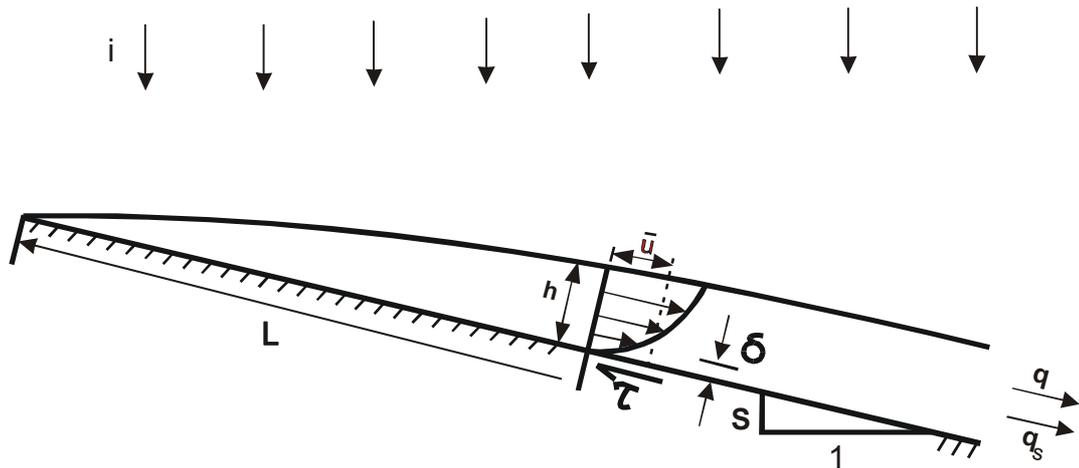


Figura 3.2. – Representação gráfica das variáveis que caracterizam um escoamento.
Fonte: JULIEN, P.Y.; SIMONS, D.B. (1985).

Desde os trabalhos desenvolvidos por Savat (1977 e 1980) para estudar o comportamento dos parâmetros hidráulicos e a resistência ao fluxo em escoamentos rasos sobre fundos lisos e rugosos, vários outros estudos procuraram avaliar os efeitos provocados pelos diferentes tipos de fundo e pela carga de sedimentos em transporte pelo fluxo sobre as características hidráulicas do escoamento, entre os quais, Abrahams *et al.*, (1986); Gilley e Finkner (1991); Abrahams e Parsons (1991); Gilley *et al.* (1992); Abrahams e Atkinson (1993) e Prosser e Dietrich (1995).

A maior parte dos trabalhos citados procurou avaliar a presença do(s) elemento(s) rugoso(s) e a sua relação com o crescimento do número de Reynolds. A presença do(s) elemento(s) rugoso(s) foi estudada de duas maneiras. A primeira delas é a condição em que o escoamento superficial transita através dos obstáculos (“serpenteia”), ou seja, a espessura de lâmina do fluxo é inferior a altura do(s) elemento(s) de rugosidade. A segunda condição é aquela em que o(s) elemento(s) de rugosidade estão submersos.

A resistência oferecida ao escoamento ou, em outras palavras, a perda de carga, deve ser analisada considerando o processo de evolução do escoamento superficial. Durante uma chuva, as menores depressões superficiais são preenchidas e concomitantemente a isso a água começa a infiltrar no perfil do solo. À medida que o solo vai saturando, o escoamento superficial vai aumentando, até que, atingida a taxa de infiltração de água no solo, ele se estabelece. Assim, o fluxo que escoar sobre uma superfície raramente apresenta uma profundidade uniforme. Mesmo porque, o aumento da área contribuinte ao longo da vertente, também causa um aumento na espessura de lâmina do escoamento. As irregularidades superficiais fazem com que ocorra a interligação entre as linhas de fluxo que escoam ao redor de por exemplo, colmos de plantas e/ou material de granulometria mais grosseira. A presença

desses obstáculos, na superfície do solo, criam uma resistência à passagem do escoamento superficial.

Esta resistência à passagem do fluxo pode ser descrita através de coeficientes, tais como **C** de Chezy, **n** de Manning e fator **f** de Darcy-Weisbach (SAVAT, 1977). O fator perda de carga (**f**) é mais utilizado do que os demais coeficientes de rugosidade (**C** e o **n**) para estudos relacionados com o escoamento superficial em função da sua adimensionalidade e da sua aplicabilidade nas diferentes fases do escoamento (SAVAT, 1977; GILLEY *et al.*, 1992; GILLEY e KOTTWITZ, 1994; SELBY, 1994; GILLEY e KOTTWITZ, 1995). A expressão que permite calcular o fator **f** é:

$$f = \frac{8g R_H S_e}{V^2} \quad [3.7]$$

onde: **g** é a aceleração da gravidade, **R_H** é o raio hidráulico, **S_e** é a declividade da linha de energia e **V** é a velocidade média do fluxo.

Portanto, para avaliar a resistência hidráulica oferecida por meios deformáveis à passagem do escoamento superficial, é possível utilizar o coeficiente de perda de carga de Darcy-Weissbach (**f**). O conceito de resistência hidráulica apresentado por Einstein (1950) e testado a partir dos dados obtidos no campo por Einstein e Barbarossa (1952), possibilita subdividir as diferentes grandezas hidráulicas em parcelas vinculadas à ação da resistência de partícula e da resistência de forma, sendo que:

- 1.- **a resistência de partícula** (**f_p** ou **f''**) é aquela resultante das forças de tensão de cisalhamento e pressão exercidas sobre as partículas, microagregados e agregados de solo; e
- 2.- **a resistência de forma** (**f_f** ou **f'''**) é aquela produzida por deformações do fundo, as quais, no caso de sulcos de erosão, podem ser produzidas pela presença de pedras, restos vegetais, vegetação e microtopografia que de alguma forma são capazes de obstruir a passagem do escoamento superficial e aumentar a diferença de pressão entre esses diferentes obstáculos (ABRAHAMS e LI, 1998).

Logo, chamando o fator perda de carga de Darcy-Weissbach (fator **f**) apresentado na equação [3.7] de **f_T**, o fator **f** pode ser separado em:

$$f_T = f_p + f_f \quad [3.8]$$

No método original apresentado por Einstein (1950), a resistência ao avanço do fluxo devido à rugosidade de grão (partícula de solo) é calculada a partir de diversos parâmetros

hidráulicos, entre os quais está a rugosidade de grão equivalente, que é expressa através do d_{65} (YANG, 1996).

O resgate da abordagem construída por Einstein, no início dos anos 50, foi realizado por Govers e Rauws (1986) através da proposição de um procedimento de cálculo capaz de quantificar a participação de cada um dos diferentes tipos de resistência apresentadas à passagem do escoamento. O teste da proposta apresentada por Govers e Rauws (1986) foi realizado em um canal de laboratório por Rauws e Govers (1988). Apenas no início da década de 90, que o método foi avaliado em um experimento de campo por Abrahams e Parsons (1991).

No trabalho conduzido por Abrahams e Parsons (1991), com o objetivo de avaliar a resistência à passagem do escoamento em áreas desérticas do Estado do Arizona nos EUA e suas implicações na capacidade de transporte do fluxo, ficou demonstrado que a capacidade de transporte de sedimentos do fluxo é controlada predominantemente pela parcela tensão de cisalhamento relativa às partículas (τ_p ou τ^*) quando comparada com a tensão de cisalhamento total (τ). Além disso, os autores salientam que para a relação entre resistência total, representada por f_T , e a resistência de partícula (f_p ou f^*), a tendência de comportamento se mantém a mesma, ou seja, predomina a resistência de partícula (f_p ou f^*).

Desta forma, em situações onde a rugosidade superficial é elevada, para realizar o cálculo da capacidade de transporte é necessário atribuir um peso maior para a τ_p do que para τ ; assim, será possível evitar a superestimação da capacidade de transporte. Portanto, em áreas agrícolas situadas em regiões onde ocorre a incidência de chuvas intensas em períodos curtos e bem definidos do ano e nas zonas desérticas, a tensão de cisalhamento que atua tanto sobre as partículas como sobre os agregados de solo deve ser considerada como uma parcela importante nos processos de desagregação e de transporte das partículas de solo, embora represente uma pequena fração da tensão de cisalhamento total (τ) (RAUWS e GOVERS, 1988; ABRAHAMS e PARSONS, 1991).

A interação entre o fator perda de carga e o número de Reynolds é função, entre outros fatores, do tipo de regime de escoamento (laminar, transição ou turbulento), da característica do fundo (fixo ou móvel), da rugosidade de fundo e da relação entre as alturas de lâmina do escoamento e do(s) elemento(s) rugoso(s).

No momento em que o(s) elemento(s) de rugosidade são maiores que a altura de lâmina, os resultados de pesquisa demonstram que existe uma relação direta entre o fator perda de carga e o número de Reynolds. Portanto, com a elevação da lâmina, aumenta o perímetro molhado e com isso a resistência à passagem do escoamento.

Se o(s) elemento(s) de rugosidade são menores que a altura de lâmina a relação entre o fator f e o número de Reynolds é inversamente proporcional. Portanto, os elemento(s) de rugosidade(s) existentes ficam submersos e com isso a sua influência sobre o escoamento se torna menor, à medida que a espessura da lâmina aumenta. Desta forma, a redução na energia do escoamento vai gradativamente diminuindo (ABRAHAMS e PARSON, 1991; ABRAHAMS *et al.*, 1986).

Esta condição está ligada diretamente à seqüência evolutiva do sulcos de erosão, ou seja, da passagem da fase dos caminhos preferenciais para a fase de escoamento concentrado. A importância da etapa de escoamento concentrado nos sulcos, se torna mais clara quando se analisa a discussão apresentada no estudo desenvolvido por Nearing *et al.* (1997), onde são descritos alguns parâmetros hidráulicos e os principais aspectos envolvidos na erosão em sulcos, com ênfase aos escoamentos laminares e turbulentos.

A partir de dados avaliados, em experimentos realizados em laboratório e no campo em solos de textura arenosa e siltosa, por Nearing *et al.* (1997) foi possível perceber que para solo siltoso (com maior coesão), a partir do momento em que ocorreu a concentração do escoamento, houve a presença de erosão regressiva em uma condição de escoamento turbulento e o fator perda de carga (f) tendeu a se manter constante, mesmo com o aumento do número de Reynolds. A relação inversamente proporcional entre Re e f , comentada anteriormente, só foi verificada quando o escoamento estava em regime laminar. Nota-se que, com os resultados obtidos por Nearing *et al.* (1997) foi confirmado em sulcos, o mesmo padrão de variação do fator perda de carga (f) com o número de Reynolds do fluxo, já conhecido em escoamentos que agem sobre contornos sólidos com rugosidade fixa e representado através do Diagrama de Moody (CHOW, 1959).

Os vários modelos matemáticos desenvolvidos nos últimos 20 anos, que se propuseram a descrever o comportamento do escoamento superficial já incorporaram a relação entre f e Re . Entretanto, Abrahams *et al.* (1986), que trabalharam em áreas desérticas, sugerem que é muito difícil encontrar um só fator ou uma expressão que possa descrever todas as condições de fluxo, uma vez que, a rugosidade superficial é muito grande. Dentro desta idéia, é possível pensar que a superfície dos solos cultivados pode ser irregular como aquelas dos desertos, especialmente após as etapas de preparo de solo e da colheita.

Além dos aspectos relacionados com a rugosidade superficial e os seus efeitos na resistência à passagem do escoamento, é importante incluir nesta avaliação os impactos provocados pelas características do fundo do sulco na velocidade do fluxo, mesmo que, em estudo conduzido por Govers (1992), a velocidade do fluxo praticamente não tenha sofrido nenhum tipo de variação mesmo com mudança na declividade do canal. Entretanto, é

fundamental considerar nessa análise o tipo de fundo do sulco do local onde a informação foi obtida. Uma vez que, em experimentos conduzidos em fundo fixo, Foster *et al.* (1984a), Rauws e Govers (1988) e Abrahams *et al.* (1986) encontraram aumento na velocidade do escoamento com o incremento na declividade.

No caso específico do estudo conduzido por Govers (1992), que trabalhou em um canal de fundo móvel, contendo material com características semelhantes às de um solo agrícola, é referido que não existe dependência entre a velocidade do escoamento e a declividade do canal porque o escoamento concentrado no(s) sulco(s) provoca uma maior desagregação de partículas através do processo de erosão regressiva e com isso um aumento na rugosidade do fundo do canal; portanto, favorecendo a uma redução na velocidade do escoamento.

Para que ocorra a incisão de um sulco e o posterior desenvolvimento do processo erosivo, é necessário que uma velocidade limite seja excedida. Esta velocidade está diretamente relacionada com o tamanho das partículas sólidas. Uma determinada partícula, que seja destacada da superfície, permanecerá em suspensão até que a velocidade do escoamento superficial diminua e permita a sua deposição. De acordo com Selby (1994), as velocidades encontradas normalmente para o escoamento superficial variam entre $0,015$ e $0,30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, suficientemente grandes para provocar o movimento de material das frações silte e areia fina.

Entretanto, após a incisão e o desenvolvimento de pelo menos um sulco de erosão, a elevação da carga de sedimentos e da concentração de partículas sólidas no escoamento superficial afetam diretamente a velocidade do fluxo. No estudo realizado por Abrahams e Li (1998), que avaliaram o comportamento da velocidade em canal de fundo fixo, cuja rugosidade era de $0,00074\text{m}$ (criada artificialmente), injetando diferentes descargas líquidas e sólidas, os dados obtidos indicaram que conforme aumenta a descarga sólida ocorre uma redução na velocidade do escoamento próximo do fundo do canal. Uma das causas apresentadas pelos autores para que esse tipo de comportamento tenha ocorrido, é que o transporte de sedimentos, via saltação, possa ter retirado uma determinada quantidade de movimento do fluxo e a transferiu para as partículas que estavam em transporte na massa líquida.

3.3.4.- Início do movimento de partículas

Quando se procura avaliar as condições hidráulicas que regem o início do movimento, pode-se considerar tanto velocidades limite quanto tensões críticas. A velocidade exerce um papel muito importante quando se avalia este início de movimento, já que, em virtude de uma inerente resistência do substrato, a velocidade deve atingir um valor limite para que o

processo de retirada das partículas possa começar a se desenvolver. Também a retirada de uma partícula do substrato pode ser analisada a partir da avaliação do momento em que as forças exercidas pelo fluxo excedem as forças que tendem a manter a partícula em repouso.

Na discussão realizada por Morgan (1996) sobre a desagregação de partículas pelo fluxo é citado o trabalho original de Shields, no qual foi realizada uma análise dos processos envolvidos e das forças que atuam na determinação do limite crítico para o início do movimento de partículas. As situações contempladas no referido estudo são os declives relativamente suaves (em rios), sendo estabelecidos dois parâmetros adimensionais:

$$\Theta = \frac{\rho_w u_*^2}{g (\rho_s - \rho_w) D} \quad \text{Re}^* = \frac{u_* D}{\nu} \quad [3.9] \text{ e } [3.10]$$

onde: Θ é conhecido como número de Shields; ρ_w é a massa específica da água; u_* é a velocidade de cisalhamento do escoamento; g é a aceleração da gravidade; ρ_s é a massa específica do sedimento e D é o diâmetro da partícula. A velocidade de cisalhamento do escoamento (u_*) é expressa por: $u_* = \sqrt{g R_H S}$.

Quando o valor de Re^* é superior a 40 (fluxo turbulento) o valor crítico do número de Shields para que haja movimento de partículas oscila entre 0,04 e 0,05. Entretanto, este valor não é constante, especialmente quando o escoamento ocorre em lâminas de pouca espessura e as partículas não estão totalmente submersas ou naqueles casos em que o fluxo apresenta um número de Reynolds menor que 500.

Na conclusão do trabalho realizado por Govers (1987), com o objetivo de estudar o início do movimento de partículas em substratos de origem arenosa (cinco granulometrias) e siltosa, é referido que o critério proposto por Shields funciona bem para fluxo turbulento. Entretanto, no caso de fluxos laminares uma maior tensão de cisalhamento é requerida para que tenha início o movimento de partículas; além disso, quanto maior o diâmetro das partículas, maior será a diferença de estimativa. A alternativa apresentada pelo autor para avaliar o início do movimento em escoamento difuso é o uso da potência unitária do escoamento, ou seja, o produto da velocidade média e da declividade como foi proposto por Yang (1972).

Para material não coesivo, o diagrama de Shields é o método mais utilizado para estimar a tensão crítica de cisalhamento para partículas individuais. Entretanto, o diagrama de Shields original não deve ser utilizado para a condição de partículas com baixo peso específico e com pequeno diâmetro. Mantz (1977) realizou uma adaptação no diagrama original de Shields para que pudesse ser usado com partículas menores (Figura 3.3.).

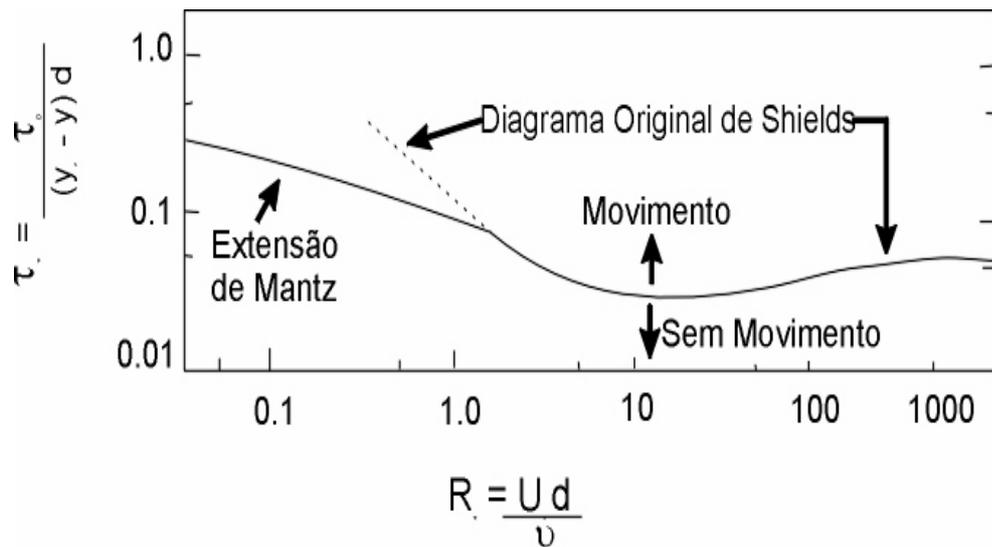


Figura 3.3.- Diagrama de Shields adaptado por Mantz (1977).

Fonte: Haan, C.T. *et al.*, 1994.

Portanto, torna-se evidente que outros fatores poderão influir diretamente no processo de início do movimento das partículas e entre estes diversos fatores estão: o impacto das gotas de chuva diretamente sobre o escoamento, o ângulo de repouso das partículas em relação ao declive, a forte influência das forças gravitacionais conforme aumenta a declividade, a coesão do solo, as mudanças na densidade do fluido conforme aumenta a concentração de sedimentos e a abrasão existente entre as partículas em movimento e o substrato (solo) logo abaixo (MORGAN, 1996).

Sob o ponto de vista da velocidade limite, como pode ser observado na Figura 3.4., quando se trata de fluxo turbulento e em situações onde predominam partículas maiores do que 0,20mm de diâmetro, a velocidade de cisalhamento crítica para que haja arrancamento aumenta com o tamanho da partícula.

Entretanto, para o caso de partículas com diâmetros inferiores a 0,20mm, a velocidade crítica de cisalhamento aumenta com o decréscimo do tamanho da partícula, uma vez que as partículas mais finas são mais difíceis de serem removidas devido às forças de coesão existentes entre os minerais de argila que as constituem. Essas relações de forças podem ser alteradas, caso anteriormente tais partículas já tenham sido desagregadas, e portanto tenham perdido a sua coesão original, tornando-se passíveis de serem removidas a baixas velocidades de cisalhamento.

É importante ressaltar que, na prática, as velocidades de cisalhamento requeridas para que o processo erosivo seja desencadeado diferem daquelas apresentadas na Figura 3.4.; uma vez que os dados apresentados foram gerados em superfícies com partículas de tamanho uniforme. Na situação real, onde existem partículas de vários tamanhos, as partículas finas são

protegidas pelas mais grosseiras e assim permanecerão até que a velocidade de cisalhamento seja suficiente para movimentar as partículas maiores.

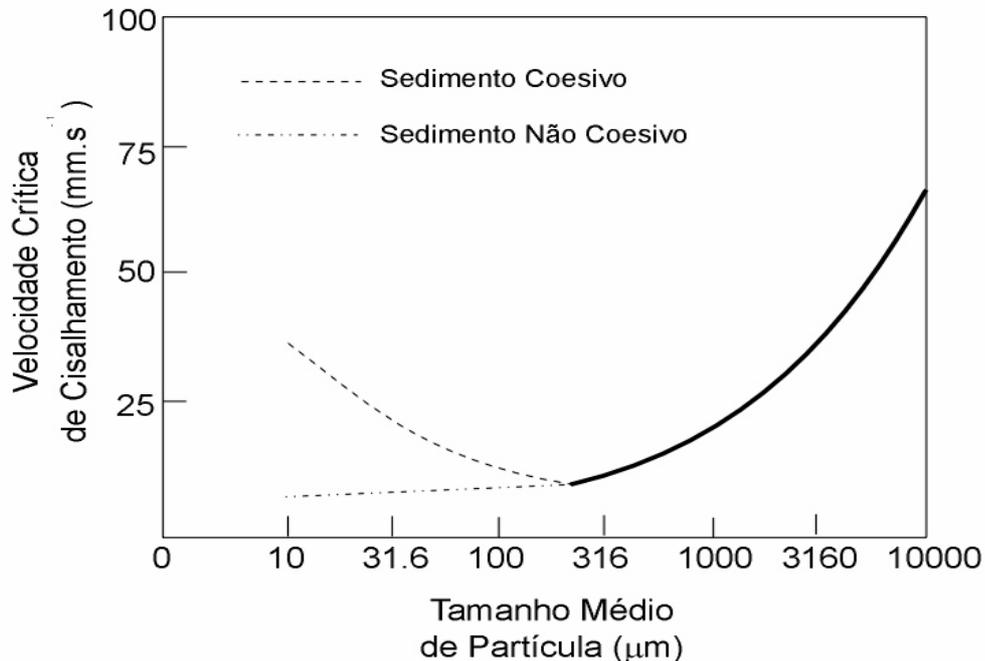


Figura 3.4.- Velocidade de cisalhamento crítica, em função do tamanho das partículas, em fluxo turbulento.

Fonte: Morgan, R.P.C. (1996).

3.3.5.- Condições hidráulicas necessárias ao início de formação de sulcos

Para começar a estudar o processo de formação de sulcos é importante ressaltar que o processo ocorre a partir de um balanço entre o material removido da região de entressulcos e da erosão que ocorre no interior do próprio sulco. Outro aspecto a ser considerado é que os sulcos irão se formar assim que for excedido um limite em relação às condições hidráulicas. Esse limite, de acordo com Selby (1994), é função da resistência do material da área onde ocorre o fluxo. A partir da compreensão dos mecanismos de geração e desenvolvimento dos sulcos é que se pode identificar um método efetivo de se avaliar o seu surgimento. Para tal é preciso conhecer as condições hidráulicas que desencadeiam o processo.

Essas condições, no entanto, variam de acordo com as propriedades do solo, com as características das encostas, com o uso e manejo do solo e com as características das chuvas predominantes. Mesmo assim, diversos autores têm sugerido algumas condições hidráulicas que seriam suficientes para que haja a formação de sulcos. Por exemplo, Govers *et al.* (1990) realizaram experimentos em um canal com 20 metros de comprimento e chegaram a conclusão de que, para um solo franco, a formação do escoamento, que acaba resultando no desenvolvimento de um sulco, é dependente das variações de umidade antecedente e da densidade aparente do solo, que irão influenciar diretamente sobre as taxas de infiltração.

Os estudos conduzidos por Rauws (1987) apontaram as condições hidráulicas mínimas para que ocorra o desenvolvimento dos sulcos de erosão. Os experimentos foram realizados em canais com 0,4m de largura, por 2,0m de comprimento. A declividade do canal variou entre 2,4 e 12,6%, com 0,10m de profundidade. A partir dos experimentos realizados em laboratório, Rauws (1987) chegou à conclusão de que, com sedimentos de pouca coesão, os sulcos começam a se formar em declividades entre 3,2 e 4,7, a partir de erosão regressiva, sempre que a velocidade de cisalhamento do fluxo de água exceder $0,032$ a $0,034\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Para essas condições o referido autor, observou que os limites das condições hidráulicas coincidem com o aparecimento de pontos de turbulência, quando se trabalha em condições de fluxo superficial.

O resultado obtido por Rauws (1987) confirma os resultados encontrados em trabalhos anteriores conduzidos por Govers (1987), os quais propõem velocidades de cisalhamento entre $0,030$ e $0,035\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, como sendo um possível limite para a formação de sulcos. Entretanto, em avaliações realizadas com o canal colocado em declividades inferiores a 3,2% a magnitude dos processos de desagregação, transporte e deposição é muito pequena.

3.4.- Princípios básicos para quantificar o processo erosivo

É importante ficar claro alguns conceitos fundamentais para a compreensão do processo erosivo como um todo, para que se possa realmente quantificar o volume de sedimento gerado em um determinado local.

Os conceitos básicos da mecânica da erosão já eram conhecidos desde a primeira metade do século passado (COOK, 1936). Portanto, equações empíricas para descrever esses processos foram desenvolvidas desde então. Nos anos 40, visando a uma melhor compreensão de como ocorrem as diferentes fases de desagregação e de transporte do sedimento gerado pela interação do escoamento com o contorno sólido, Ellison (1947a, b e c) propôs dividir o processo erosivo em pelo menos quatro sub-processos. Assim, temos:

- a) Desagregação pelo impacto da gota (\mathbf{D}_r);
- b) Transporte pelo salpico (\mathbf{T}_r);
- c) Desagregação pelo escoamento superficial (\mathbf{D}_f); e
- d) Transporte pelo escoamento superficial (\mathbf{T}_f).

Nos seus trabalhos, Ellison (1947a, b e c), discutiu qualitativamente os processos de desagregação e de transporte dos sedimentos pelos agentes erosivos, uma vez que, nesta época não era possível quantificá-los. Assim, estabeleceu e organizou as primeiras idéias para identificar os processos envolvidos na erosão dos solos. Entretanto novo salto, em termos de

modelos baseados em processo, só veio a ocorrer, no final dos anos 60, quando Meyer & Wischmeier (1969) propuseram o conceito de taxa limitante. Ou seja, este modelo estabelecia que a carga de sedimentos (q_s) estava limitada pela Taxa de Desagregação ($D_r + D_f$) ou pela Capacidade de Transporte ($T_r + T_f$), dependendo de qual delas apresentasse menor valor.

Além disso, Meyer & Wischmeier (1969) propuseram equações separadas para cada um dos processos. Esta foi a primeira tentativa de construir-se um modelo que estimasse a erosão a partir da descrição física do processo erosivo.

3.4.1.- Equação da continuidade do fluxo sólido

A equação básica, para os processos fundamentais relacionados com a erosão, é a equação da continuidade da massa. De acordo com Foster (1982), a equação escrita para o escoamento superficial é:

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + \rho_s \frac{\partial (cy)}{\partial t} = D_r + D_i \quad [3.11]$$

onde: q_s é a carga de sedimento, x é a distância no declive, ρ_s é a massa específica das partículas do sedimento, c é a concentração do sedimento, y é a espessura de lâmina de escoamento, t é o tempo, D_r é a erosão ou a taxa de deposição nos sulcos e D_i é quantidade de sedimento gerada no entressulco e que aporta no sulco.

O termo $\frac{\partial q_s}{\partial x}$ representa a mudança na taxa de fluxo de sedimentos ao longo do declive e o termo $\rho_s \frac{\partial (cy)}{\partial t}$ representa a mudança na quantidade de sedimento em função do tempo. Em alguns casos, como no escoamento quase-estacionário, onde uma discretização temporal é usada para solucionar a equação [3.11], o termo $\rho_s \frac{\partial (cy)}{\partial t}$ pode ser considerado constante em pequenos intervalos de tempo, reduzindo assim a equação da continuidade para (FOSTER, 1982):

$$\frac{dq_s}{dx} = D_r + D_i \quad [3.12]$$

No caso de ocorrer erosão (incisão), o termo D_r é definido como sendo:

$$D_r = D_{rc} \left(1 - \frac{q_s}{T_c} \right) \quad [3.13]$$

onde: D_{rc} é a taxa máxima de erosão, expressa em $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$; q_s é a carga de sedimentos, expressa em $\text{kg m}^{-1}.\text{s}^{-1}$; T_c é a capacidade de transporte do escoamento superficial, expressa em $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

O termo entre parênteses na equação [3.13] é o responsável pela redução gradativa da taxa de erosão, quando o escoamento se torna carregado de sedimento. Portanto, quando a carga de sedimento do escoamento (q_s) se aproxima da capacidade de transporte do escoamento (T_c) não haverá mais erosão. O termo entre parênteses tenderá a zero. Se $q_s > T_c$, haverá deposição e não erosão. As relações propostas na equação [3.13] são ilustradas na Figura 3.5.. Na Figura, é suposto que um fluxo, sem a presença de sedimento, entra em um canal cujo fundo é constituído de material erodível (fundo móvel), por exemplo solo.

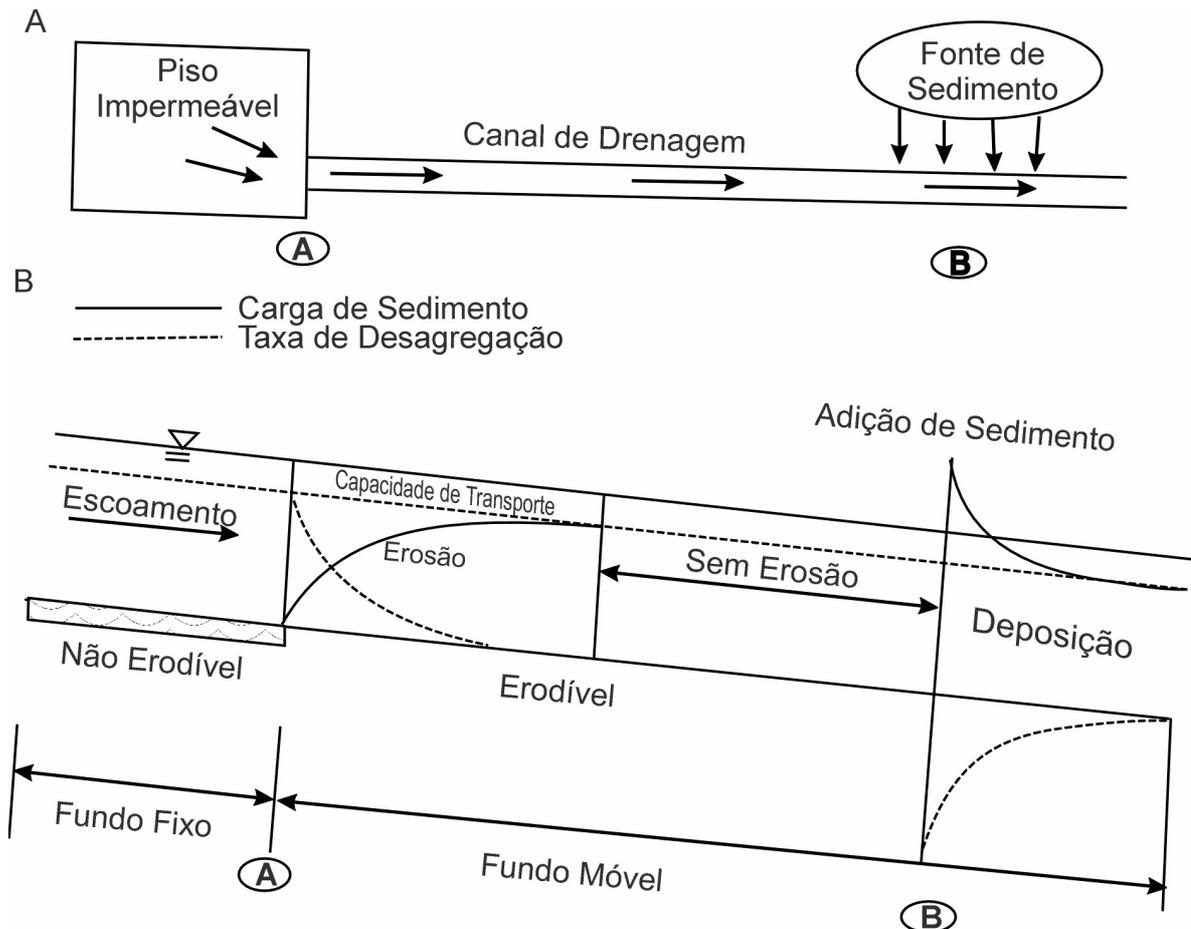


Figura 3.5.– Ilustração referente às interações entre a carga de sedimento, a desagregação e a deposição em sulco e a capacidade de transporte do fluxo. (A) Vista em planta. (B) Alterações nas taxas de desagregação e transporte ao longo de um canal infinitamente longo.

Fonte: Haan, C.T. et al. (1994).

O solo é desagregado a uma taxa que decresce exponencialmente com a distância percorrida pelo fluxo, até o momento em que em que a carga de sedimento se torna igual à capacidade de transporte do escoamento. No momento em que o sedimento é adicionado ao fluxo, deverá ocorrer o processo de deposição até o instante em que a carga de sedimento novamente se iguale à capacidade de transporte. A ilustração apresentada na Figura 3.5.

descreve as alterações que ocorrem na desagregação em função da carga de sedimento e da capacidade de transporte.

3.4.2.- Mecanismos de transporte e de deposição dos sedimentos

A água que escoar sobre uma condição de fundo móvel exerce força sobre as partículas sólidas que compõem o substrato. Estas forças tendem a movimentar os sedimentos. As forças que resistem à ação do escoamento dependem das propriedades do material que forma o fundo. Se o fundo é constituído por material de granulometria mais grossa (areia ou pedregulho), a força de resistência é o peso. No caso de material de granulometria mais fina (silte ou argila), a oposição ao movimento das partículas é realizada principalmente pelas forças de coesão.

As forças que atuam sobre uma partícula mergulhada em uma massa líquida em movimento são:

- a.- O peso submerso da partícula;
- b.- A força de sustentação: que age no sentido oposto à ação da gravidade, forçando a subida da partícula; e
- c.- A força de arraste: que impulsiona a partícula no mesmo sentido do escoamento.

Da relação entre estas três forças surgem as diferentes modalidades de transporte sólido. No momento em que a força de sustentação equilibra a da gravidade, a partícula desloca-se para jusante flutuando na massa líquida. Neste caso, ocorre o transporte por suspensão.

A partir do momento em que o peso de uma partícula superar a força de sustentação, esta partícula sólida descerá para o fundo e, sob a ação da força de arraste, desloca-se para jusante. O transporte por arraste pode ocorrer de três maneiras:

- a.- **Deslizamento**: ocorre quando a partícula escorrega sobre o leito. É característico dos grãos (partículas de solo) de forma lamelar (disco) e de leitos quase planos;
- b.- **Rolamento**: ocorre em situações onde o fundo é composto por material de forma esférica, ocorre quando a partícula gira em torno de um eixo horizontal, deslocando-se sobre o leito; e
- c.- **Saltação**: através da interação entre as forças de sustentação e de arraste, a partícula percorre a sua trajetória aos “saltos”, ou seja, parte do tempo ela se encontra em suspensão, parte em contato direto com o fundo. O transporte por saltação pode ocorrer tanto sob condições de regime laminar como de regime turbulento (LEEDER, 1999).

Na Figura 3.6. é possível observar as interações existentes entre as diferentes forças que atuam sobre uma partícula quando ela está no interior da massa líquida, alguns parâmetros hidráulicos, os diferentes tipos de transporte sólido possíveis e as formas pelas quais cada um deles pode se manifestar.

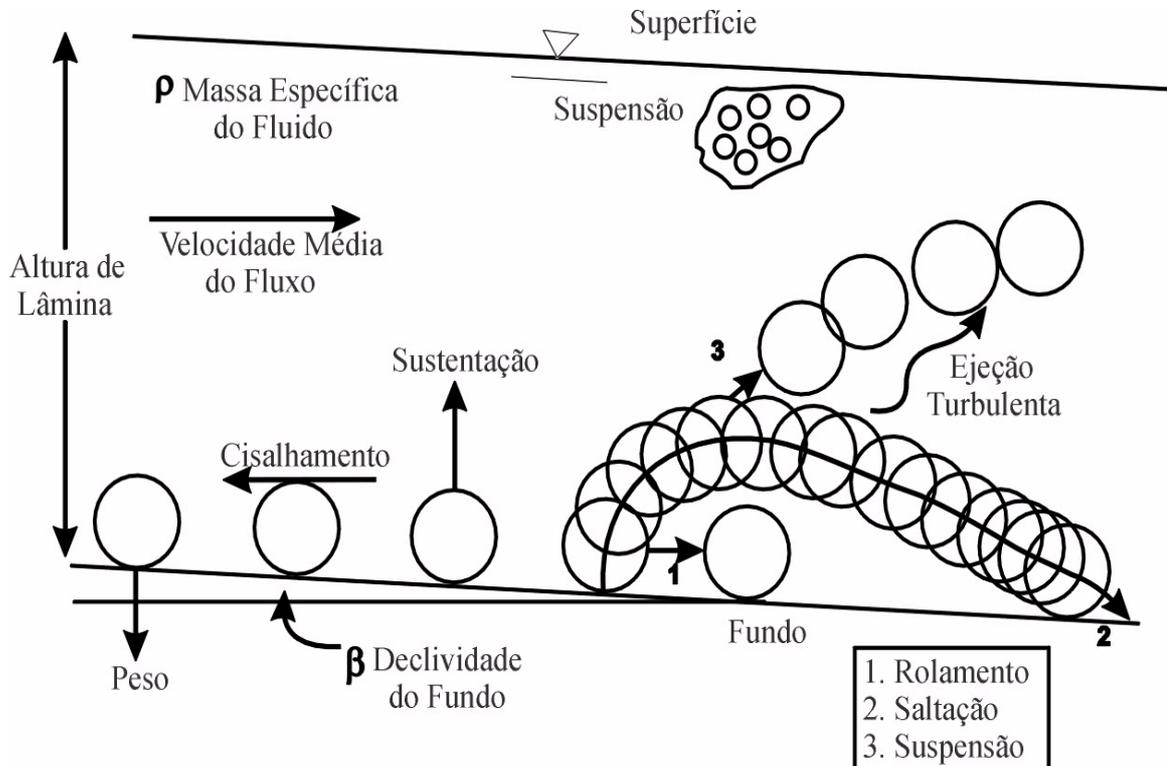


Figura 3.6.- Ilustração que mostra os diversos caminhos que as partículas sólidas podem seguir a partir do momento que são desagregadas e incorporadas ao escoamento superficial e alguns componentes do sistema.

Fonte: LEEDER, M. (1999).

Considerando um conjunto de grãos (partículas de solo) que se movem sobre o fundo, é possível observar que as partículas sólidas não permanecem indefinidamente em movimento, mas repousam após haverem percorrido um determinado trecho. Isso ocorre devido à aleatoriedade das forças de sustentação e de arraste. A fase de repouso pode ser temporária ou permanente. A situação em que ocorre a parada total das partículas sólidas junto ao fundo é chamada de depósito.

No caso específico de canais de fundo móvel, a identificação do processo de deposição se torna mais difícil em função da possibilidade da existência de erosão, ou seja, dos rebaixamentos e das elevações em determinados pontos da superfície, que podem mascarar a identificação dos depósitos.

Um critério, para identificar a deposição em canal de fundo móvel, é considerar as modificações ocorridas no perfil longitudinal do leito. Quando a cota média do leito

permanece muito próxima ou oscilando em torno daquela observada inicialmente, diz-se que o leito se encontra em equilíbrio dinâmico. Portanto, com base nesta situação de equilíbrio e após a aplicação de vazões crescentes e sucessivas sobre o maciço de solo, por exemplo, poderão ocorrer mudanças significativas na superfície. As deformações serão percebidas a partir do levantamento das cotas da superfície do solo.

3.4.3.- Capacidade de transporte e escoamento superficial

A capacidade de transporte do escoamento superficial é um parâmetro de fundamental importância na descrição dos processos de erosão e deposição nos modelos fisicamente baseados. A maioria dos modelos de previsão de perdas por erosão com base física, que foram desenvolvidos nas últimas décadas, contém uma equação de transporte sólido. Na maioria dos casos, as fórmulas utilizadas foram desenvolvidas para rios.

Portanto, em grande parte das oportunidades, os coeficientes empíricos necessitam ser modificados e validados. Foster e Meyer (1972b) propuseram a equação de Yalin (1963) como sendo a mais indicada para estimar a capacidade de transporte no caso de escoamentos rasos, por ter uma base teórica compatível com o transporte de sedimentos via rolamento e saltação, por necessitar de poucos parâmetros para ser utilizada (raio hidráulico e declividade), por ser utilizada em situações de escoamento de lâmina rasa, além de ser de fácil resolução.

Contudo, os resultados do trabalho realizado por Savat (1980) mostraram que as concentrações de sedimentos medidas durante experimentos realizados em canais recirculantes contendo solos argilosos foram, aproximadamente, 25,0% daquela prevista pela equação de Yalin. Entretanto, Alonso *et al.* (1981) conclui que a equação proposta por Yalin dá bons resultados para escoamento raso em superfícies côncavas com relativamente baixa carga de sedimento. Contudo, os resultados obtidos por Govers (1985) mostraram que a capacidade de transporte do escoamento superficial, em áreas declivosas, pode ser muito mais alta que aquela prevista pela equação de Yalin.

O conceito de excesso de tensão cisalhante é utilizado em algumas das fórmulas de transporte sólido mais antigas. A capacidade de transporte, expressa como sendo uma descarga sólida, é então relacionada ao excesso de tensão cisalhante, sendo a diferença entre a tensão de cisalhamento real e a tensão de cisalhamento crítica, necessária para o início de movimento. A tensão de cisalhamento (τ) é calculada por:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R_H \cdot S \quad [3.14]$$

onde: ρ é o massa específica da água; g é a aceleração da gravidade; R_H é o raio hidráulico e S é a declividade.

Bagnold (1966) foi o primeiro a introduzir uma equação que não era baseada em um balanço de forças, mas sim em um balanço de energia. Ele introduziu o conceito de potência do escoamento, que representa a quantidade de energia dissipada por unidade de tempo e de superfície de fundo. A potência do escoamento pode ser expressa como o produto da tensão de cisalhamento e a velocidade média.

Posteriormente, Bagnold estabeleceu que existe somente uma única relação entre capacidade de transporte de sedimentos e potência do escoamento, caso a espessura de lâmina do escoamento seja constante. Finalmente, Bagnold (1977) propôs a seguinte relação:

$$q_s \approx \frac{(\omega - \omega_{cr})^{1.5}}{\left(R_H^{2/3} D^{1/2}\right)} \quad [3.15]$$

onde: ω é potência do escoamento; ω_{cr} é o valor da potência do escoamento crítica, no momento em que o movimento começa; R_H é o Raio hidráulico e D é o diâmetro das partículas.

A expressão $\frac{(\omega - \omega_{cr})^{1.5}}{R_H^{2/3}}$ deve ser considerada como a potência efetiva (Ω),

corrigida pela espessura de lâmina.

Yang (1972) introduziu o conceito de potência unitária, que é a quantidade de energia dissipada por unidade de tempo e por unidade de peso do fluxo, e que é igual ao produto entre a declividade e da velocidade média. Entretanto, o resultado não está relacionado diretamente com a descarga sólida e sim com a concentração de sedimento. Posteriormente, Yang (1973) desenvolveu uma equação adimensional mais complexa, baseada em quatro grupos adimensionais que descrevem o fluxo e o sedimento: uma das equações considera a potência do escoamento crítica requerida para o início do movimento, condição não contemplada na equação gerada anteriormente. O parâmetro mais importante é, de acordo com o próprio autor, o adimensional potência unitária do escoamento, que é igual à potência do escoamento dividida pela velocidade de queda das partículas. Já nos anos 80, Moore e Burch (1986) concluíram que a fórmula proposta por Yang (1973) apresentou resultados promissores no momento de estimar a capacidade de transporte, tanto para os escoamentos difusos como para aqueles concentrados nos sulcos.

Em estudos realizados para produzir um novo modelo de erosão, visando a representação do fenômeno através de princípios físicos, que consideram que os processos de

desagregação, transporte e deposição ocorrem simultaneamente, Hairsine e Rose (1992a) e Hairsine e Rose (1992b) expressaram a definição de potência do escoamento (Ω) da mesma forma que o conceito enunciado por Bagnold (1966):

$$\Omega = \rho \cdot g \cdot S \cdot q \quad [3.16]$$

onde: ρ é a massa específica do fluido; g é a aceleração da gravidade; S é a declividade e q é a descarga líquida por unidade de largura.

No modelo apresentado por Hairsine e Rose (1992a) e Hairsine e Rose (1992b) é proposto que a energia do escoamento seja expressa através da potência do escoamento (Ω). Esta energia poderá ser utilizada para pelo menos quatro processos:

- 1.- Desagregação do solo pelo escoamento superficial;
- 2.- Desagregação do contorno sólido pela ação dos processos de erosão regressiva e do solapamento;
- 3.- Resuspensão do sedimento em repouso sobre o substrato; e
- 4.- Deposição do sedimento.

Em cinco ensaios de laboratório e um experimento de campo, utilizando dois tipos de solos e aplicando três tipos de metodologias experimentais, Nearing *et al.*, (1997) correlacionaram a carga de sedimentos gerados com a expressão apresentada na equação [3.15] e obtiveram o melhor ajuste através de uma curva do tipo logística, sendo que o coeficiente de determinação encontrado foi da ordem de 0,93.

Os modelos propostos por Foster e Meyer (1972a), e por Hairsine e Rose (1992a) e Hairsine e Rose (1992b) apresentam resultados semelhantes em termos de desagregação do solo e do incremento na descarga sólida, conforme o escoamento superficial avança sobre a superfície do solo, colocado no interior de em um canal experimental, conforme pode ser observado na Figura 3.5..

O comportamento das curvas, mostradas na Figura 3.5., evidencia uma redução exponencial das taxas de desagregação associada com um crescimento exponencial da carga de sedimentos, conforme o escoamento avança sobre a região de fundo móvel (erodível) até que seja atingido um ponto de equilíbrio. Neste momento, a relação entre as duas curvas passa a ser constante (ausência de erosão), ou seja, a desagregação atinge a concentração de equilíbrio (MERTEN, 2000).

Entretanto, existe uma diferença de enfoque entre os dois modelos que foram comentados anteriormente. A diferença fundamental está no fato de que Foster e Meyer (1972.a) consideram que, no ponto de equilíbrio, é atingida a capacidade de transporte do

escoamento e que a energia do escoamento é utilizada, exclusivamente, para o transporte de sedimentos. Portanto, não existe o processo de desagregação.

No modelo proposto por Hairsine e Rose (1992a) e Hairsine e Rose (1992b), o ponto de equilíbrio é interpretado como sendo o momento em que a superfície do substrato está coberta pelos sedimentos já desagregados e que estavam em trânsito na massa líquida e/ou já depositados sobre o fundo. Desta forma, o modelo supõe que a superfície do substrato está protegida contra a ação das forças de desagregação, que estão atuando sobre a superfície do solo, e que, neste momento, as taxas de deposição são semelhantes às taxas de resuspensão das partículas sólidas que estavam em repouso (MERTEN, 2000; MERTEN *et al.*, 2001).

3.4.4.- Interação entre a carga de sedimentos e a capacidade de transporte

A interação entre a carga de sedimento e a capacidade de transporte é um aspecto muito importante a ser considerado na modelagem da erosão em sulcos nas Equações [3.17] e [3.18]. Nos estudos conduzidos por Foster e Meyer (1972a) e Foster e Meyer (1975) foi proposto que a desagregação e a deposição, que ocorrem nos sulcos, são proporcionais à diferença entre a capacidade de transporte e a carga de sedimentos, ou seja:

$$D_r = C_1(T_c - q_s) \quad [3.17]$$

onde: C_1 é um coeficiente; T_c é a capacidade de transporte e q_s é a carga de sedimento.

No momento em que se supõe que a máxima capacidade de desagregação (D_{rc}) é proporcional à capacidade de transporte, ou seja:

$$D_{rc} = C_1 T_c \quad [3.18]$$

A relação que define a interação entre a carga de sedimento e a capacidade de transporte, pode ser apresentada da seguinte forma (FOSTER e MEYER, 1972a):

$$\frac{D_r}{D_{rc}} + \frac{q_s}{T_c} = 1 \quad [3.19]$$

A partir da equação [3.19] é possível observar que a desagregação em sulcos é igual a capacidade máxima de desagregação quando a carga de sedimento é igual a zero. A recíproca

é verdadeira, quando a carga de sedimento é igual a capacidade de transporte, D_r se aproxima de zero.

Foster e Meyer (1972a) utilizaram o conceito de potência do escoamento para fundamentar os conceitos propostos, acreditando que um determinado escoamento apresenta uma quantidade finita de energia que poderá ser usada para transportar ou desagregar partículas. Entretanto, a mesma energia não poderá ser utilizada para os dois processos.

O termo D_r/D_{rc} presente na equação [3.19] representa a quantidade relativa de energia gasta para desagregar o sedimento e o termo q_s/T_c a quantidade relativa de energia gasta no transporte de sedimento. A soma destes dois termos é igual a unidade, ou seja, igual a energia total disponível.

Estes conceitos também podem ser aplicados para a fase de deposição. Quando aplicarmos a equação [3.19], para a deposição haverá uma variação no valor do coeficiente C_1 , presente na equação [3.17]. Entretanto, ainda não existem relações validadas para descrever o fenômeno.

No caso de um canal de fundo móvel, a avaliação da fase de deposição pode ser realizada a partir da comparação entre a desagregação (D_R) que ocorre em um sulco de erosão, assumindo que ela constitui a carga sólida em transporte, e a capacidade de transporte do escoamento superficial (CT). Assim, três situações poderão se estabelecer. Na Figura 3.7. são apresentados diferentes perfis médios de fundo que podem ser gerados com base nessa comparação.

- a) No perfil I, a carga de partículas sólidas em transporte supera a Capacidade de Transporte do escoamento superficial, provocando deposição e uma sobre-elevação do leito. Portanto, $D_R > CT$;
- b) No perfil II, os processos de erosão e deposição ocorrem de forma que, em termos médios, o perfil do fundo oscila em torno de sua posição original, caracterizando uma situação em que a carga de partículas sólidas em transporte se iguala a Capacidade de Transporte do escoamento superficial. Portanto, $D_R = CT$; e
- c) No perfil III, observa-se que a carga de partículas sólidas injetada é inferior à Capacidade de Transporte do escoamento superficial, o que impõe erosão no fundo. Resultando em um rebaixamento generalizado das cotas do leito. Portanto, $D_R < CT$.

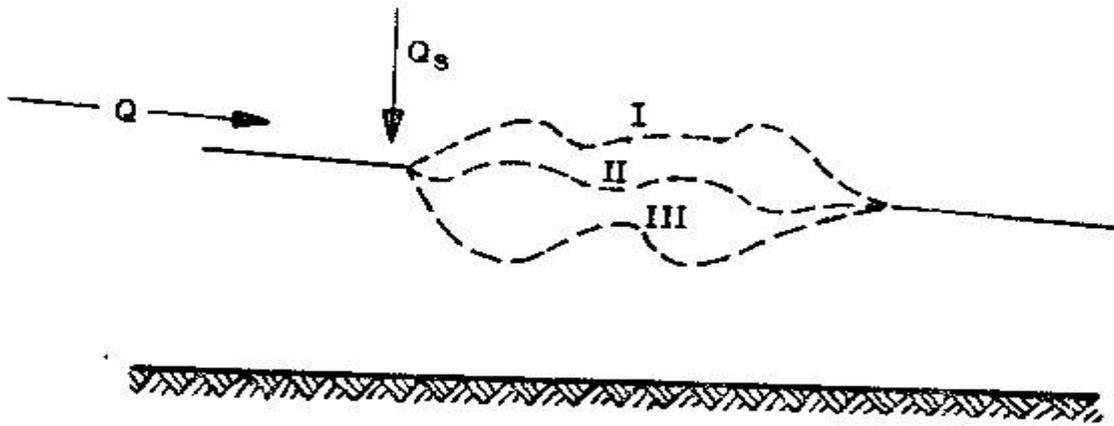


Figura 3.7.- Deformações de fundo, possíveis de serem identificadas, no perfil longitudinal de um canal de fundo móvel.

Fonte: BORGES, A.L.O. (1987).

3.5.- Estudos de erosão – Experimentos de laboratório

Apesar de já poderem ser considerados, na prática, sulcos desde a fase de micro-canais, as incisões iniciais presentes na superfície do solo são tão pequenas (milimétricas), que na maioria das vezes não são muito perfeitamente identificáveis. Esse tipo de evolução que ocorre na natureza é melhor observado quando são realizados estudos de laboratório, os quais permitem um maior controle e acompanhamento dos processos de evolução dos sulcos (GUERRA, 1999).

A identificação dos vários estágios de evolução dos sulcos é de importância fundamental, uma vez que o sulco é o ponto de partida para o avanço do processo erosivo. Além disso, é só a partir do entendimento do início do processo que se podem tomar medidas no sentido de se evitar o estabelecimento do processo. Essa identificação é mais precisa quando se adota experimentos de laboratório. As pesquisas realizadas na área de erosão procuram compreender o movimento da água e da água + sedimentos, em diferentes escalas. Na busca do entendimento deste fenômeno, as metodologias disponíveis para quantificar perdas por erosão, podem ser sistematizadas da seguinte forma:

- a) Estudo direto da erosão do solo, sob condições naturais, em parcelas de diferentes tamanhos;
- b) Estudo de propriedades físicas e químicas dos solos com o intuito de correlacioná-las com a resistência à erosão; e
- c) Estudos diretos, em condições de campo e/ou laboratório, com o objetivo de avaliar a resistência dos solos através de metodologias desenvolvidas, especialmente, para essa finalidade.

As três metodologias apresentadas são as diferentes abordagens utilizadas, até hoje, no estudo do processo erosivo. A primeira delas pode ser demonstrada pelos exaustivos esforços realizados pelo Serviço de Conservação de solo dos Estados Unidos, da metade dos anos 30 até os anos 50, no sentido de gerar os dados de campo que possibilitaram a criação da Equação Universal de Perda de Solo (USLE). Esta metodologia é utilizada nos dias atuais, em muitas regiões do mundo para quantificar as perdas de solo.

A segunda metodologia, nada mais é do que os diferentes esforços empregados para definir a erodibilidade como uma função das propriedades do solo. Os primeiros trabalhos desenvolvidos com esse objetivo datam da década de 30, sendo que as propriedades do solo definidas como chave foram a textura, a estabilidade de agregados e o índice de dispersão. Entretanto, uma resposta não pode ser esperada para um futuro próximo; uma vez que, tais alterações, nas propriedades do solo, não se manifestam durante o ciclo de uma cultura ou mesmo de um ano para o outro.

A terceira metodologia, ou seja, aquela que utiliza procedimentos específicos para avaliar a resistência do solo às forças erosivas, permite que se conheça os processos envolvidos e, desta forma, que se possa construir a base para o desenvolvimento de modelos físicos. Nesta abordagem, os experimentos são conduzidos de forma controlada, para quantificar determinado processo ou os fatores que afetam diretamente o processo em estudo. Um dos modelos utilizados atualmente, o *Water Erosion Prediction Project* –WEPP (NEARING *et al.*, 1989), foi gerado dentro desta concepção.

Os estudos realizados na escala de laboratório são fundamentais para entender como o processo avança. Os estudos conduzidos por diversos autores (FOSTER *et al.*, 1984a; FOSTER *et al.*, 1984b; MERRITT, 1984; RAUWS, 1987; BRYAN e POESEN, 1989; GOVERS, 1989; GOVERS *et al.*, 1990; SLATTERY e BRYAN, 1991; HUANG e LAFLEN, 1996; HELMING *et al.*, 1998) têm demonstrado a importância dos ensaios de laboratório. Sendo que as soluções apresentadas por Huang e Laflen (1996) e por Helming *et al.* (1998), para a montagem das suas estruturas experimentais, foram importantes tanto para a concepção como para construção dos diferentes sistemas que permitem o funcionamento do canal de declividade variável construído para a realização do Estudo I (descrito no item 4.1.).

Estes trabalhos citados, cada um a seu modo, contribuem para o levantamento, em condições controladas, de alguns dos parâmetros hidráulicos fundamentais, tais como: a altura de lâmina, a velocidade e a tensão de cisalhamento do fluxo. A partir da obtenção desses dados é possível compreender algumas das questões relacionadas com a evolução dos sulcos, com os seus vários estágios de desenvolvimento e com as condições hidráulicas para a sua

formação, tanto para as situações onde a lâmina é rasa como para lâminas mais espessas ou ainda em condições de sulcos pré-formados ou gerados a partir da ação direta do escoamento.

Os esquemas experimentais propostos envolvem diferentes intensidades de chuva, diversos tipos de solos e de inclinação dos canais experimentais. Em suma, acredita-se que só através desta grande variedade de estudos, será possível chegar a uma compreensão mais precisa de como, onde e porque os sulcos surgem, evoluem e se conectam entre si. A partir disso, será possível adotar medidas preventivas, no sentido de promover a conservação dos solos, evitando o estabelecimento de tais processos, em especial nas áreas agrícolas.

Os trabalhos de laboratório, se por um lado utilizam condições simuladas, tanto em termos de chuva, como em termos de estrutura do solo, que quase sempre é alterada, por outro lado permitem maior controle no trabalho experimental. Não há risco de haver interferências externas, quando os procedimentos são realizados em laboratório. Essas interferências podem ser devidas ao vento, à chuva natural, às temperaturas muito altas ou muito baixas, ao fornecimento de água, à variação da luminosidade ao longo do dia, principalmente quando está se fazendo registro dos experimentos, seja através de fotografias ou vídeos.

Os dados levantados no campo e/ou em laboratório, até aqui apresentados, nos levam a compreender que, a partir do momento em que o escoamento superficial passa da fase de difuso para concentrado, a tendência é aumentar a sua energia e alterar as suas características hidráulicas, como por exemplo, a tensão de cisalhamento e a potência do escoamento. Logo, acompanham esse crescimento energético os processos de desagregação e de transporte das partículas sólidas, influenciando diretamente na produção de sedimentos, no assoreamento de reservatórios e na degradação da qualidade do solo e da água.

Desta forma, torna-se crucial identificar essas duas fases do processo erosivo e descrever tanto o comportamento dos parâmetros hidráulicos envolvidos em cada fase como o ponto de incisão dos sulcos. Na literatura, é descrito o comportamento de alguns parâmetros hidráulicos para solos arenosos e siltosos, com base em dados de estudos conduzidos no Canadá, nos Estados Unidos e na Europa. Entretanto, pouco se sabe sobre o comportamento desses parâmetros para solos de textura argilosa, por exemplo, os Latossolos brasileiros.

A intenção deste estudo, que será descrita no próximo tópico, é avaliar o processo de desagregação e o transporte das partículas sólidas em um maciço de solo argiloso moldado em um canal de declividade variável, onde é possível elevar gradativamente a energia do escoamento superficial através de incrementos sucessivos na declividade e na vazão de alimentação do canal.

4.- Material e Métodos

4.1.- Introdução

No capítulo que discute as interações entre o escoamento superficial e a erosão do solo GERITS *et al.* (1990) comentam que, no futuro e em uma condição ideal, um modelo de previsão de erosão com base física deverá permitir que qualquer usuário possa adaptá-lo ou mesmo modificá-lo para ser usado em uma situação específica. Logo, este seria um dos rumos que a pesquisa em erosão hídrica poderia seguir.

Na ótica desses autores, sendo este o caminho a ser seguido, haveria a necessidade de envolver uma maior atenção, por parte dos pesquisadores, no estudo da dinâmica dos processos de desagregação, transporte e deposição; tendo em mente a condução de experimentos que agreguem aos solos estudados, os solos coesivos e que avaliem aspectos relacionados com a incisão e a evolução de sulcos.

Dentro deste contexto, a proposta do presente estudo inclui a observação, a descrição e a quantificação dos processos erosivos-deposicionais propriamente ditos e a quantificação dos parâmetros hidráulicos diretamente relacionados com o tipo de comportamento encontrado para cada declividade e vazão aplicada no canal experimental. Portanto, a implementação dessas idéias na prática envolveu o planejamento, a construção, a montagem e a calibração de uma estrutura experimental que possibilitasse a realização da proposta de pesquisa.

A Etapa I envolveu a moldagem de um maciço de solo. O solo foi coletado na região do planalto médio do Rio Grande do Sul e colocado no interior de um canal de declividade variável construído no Laboratório de Processos Erosivos e Depositionais (LaPED) no IPH no Campus do Vale da UFRGS. Na Tabela 4.1. estão descritas, de forma sucinta, as atividades desenvolvidas antes, durante e depois de cada um dos eventos que compuseram os dois estudos realizados.

A viabilização desta proposta de trabalho passou por diversas fases, entre as quais, o planejamento e a elaboração do projeto da estrutura experimental; a integração dos sistemas de alimentação do canal, de controle da vazão, do controle da declividade, a definição de como seriam realizadas as coletas do material transportado e de como seria realizada a avaliação dos parâmetros hidráulicos básicos (velocidade e altura de lâmina).

Concluída a fase de pré-ensaio, foram conduzidos os eventos utilizando maciços constituídos por areia e carvão para a avaliação do funcionamento da estrutura construída e para o entendimento, por parte da equipe de trabalho, da rotina experimental. Logo depois desta fase, o solo foi coletado e começaram os testes para a definição das declividades de trabalho e das vazões crescentes a que seria submetido o maciço de solo.

Tabela 4.1.- Síntese das atividades desenvolvidas durante os Estudos I e II, onde são descritas as atividades pré-evento, o local e o momento em que foi realizada cada atividade ligada ao ensaio e o objetivo e/ou resultado da ação.

Fase	Etapa	Local	Objetivo e/ou Resultado
PRÉ-ENSAIO	- Projeto e construção do canal;	LaPED e Empresa Compasso	- Montar o canal de declividade variável;
	- Escolha, coleta e secagem do solo;	Passo Fundo/RS e LaPED	- Obtenção de solo argiloso;
	- Instalação do canal: dos sistemas de alimentação, de saturação do maciço, de enchimento, de leitura de velocidade, de altura de lâmina e de coleta do material transportado;	LaPED	- Teste do funcionamento conjunto de todos os sistemas que compõem a da estrutura experimental;
	- Adaptação, preparo e calibração do simulador de chuvas;	LaPED	- Quebra dos agregados de maior diâmetro e uniformização da superfície do solo;
	- Testes preliminares da estrutura experimental, usando como substrato carvão, areia e solo;	LaPED	- Definir as vazões, as declividades e a intensidade da chuva;
ENSAIO	- Aplicação das cinco vazões crescentes e sucessivas sobre o maciço, com o canal nas três declividades;	LaPED	- Provocar os processos de desagregação e transporte de partículas sobre o maciço;
	- Levantamento da velocidade e da altura de lâmina do escoamento superficial;	LaPED	- Obtenção dos parâmetros hidráulicos básicos para caracterizar o escoamento;
	- Acompanhamento da evolução da concentração de sedimentos no escoamento;		- Quantificação temporal dos processos de desagregação, transporte e deposição;
	- Descrição e anotação das alterações ocorridas na superfície do maciço de solo;		- Avaliação espacial da distribuição dos processos erosivo-deposicionais;
PÓS-ENSAIO	- Documentação fotográfica da superfície do maciço de solo em cada uma das seis seções;	LaPED	- Documentação dos processos erosivo-deposicionais;
	- Coleta e limpeza de todo o material transportado que ficou retido na Cuba-I;	LaPED	- Quantificação do tamanho das partículas transportadas e da perda de solo;
	- Preparo das amostras do escoamento superficial coletadas na extremidade da Cuba-I;	LaPED e Lab. de Sedimentos	- Cálculo da concentração pontual de sedimentos no fluxo e da perda de solo;
	- Peneiração úmida do material coletado na Cuba-I;	Lab. de Sedimentos	- Construção da curva granulométrica;
	- Associação entre as informações espaço-temporais do sobre o processo erosivo descritas durante e após cada ensaio;	Lab. de Sedimentos	- Criar a seqüência evolutiva dos sulcos de erosão para solo argiloso a partir do ponto de incisão de um sulco;

Durante os eventos, os maiores cuidados foram com o detalhamento da evolução dos processos de desagregação, transporte e deposição que estavam ocorrendo quase que simultaneamente no canal de declividade variável. Na fase pós-ensaio, cada seção era fotografada e uma nova descrição da rugosidade superficial do maciço de solo era realizada, utilizando o rugosímetro.

Etapa I: Geração de sulcos de erosão, em meio coesivo, a partir da aplicação de vazões sucessivas e alteração na declividade

O desenvolvimento desta primeira parte envolveu o trabalho experimental e foi realizado nas instalações do Laboratório de Processos Erosivos e Depositionais (LaPED) existente junto ao Setor de Hidráulica Aplicada do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.

4.2.- Instalações e Equipamentos

Neste laboratório, foi construído um canal de declividade variável, que foi instrumentado com os equipamentos necessários para a descrição da rugosidade da superfície do maciço de solo, para a avaliação da altura de lâmina do escoamento superficial e para a documentação fotográfica dos eventos. Também faz parte das instalações um simulador de chuva para a realização da chuva pré-ensaio e estrutura para a coleta do material desagregado e transportado pelo escoamento superficial.

Além disso, no Pavilhão Fluvial existem locais adequados para o armazenamento do solo coletado e o espaço para a disposição do solo, à sombra, para a secagem. No Laboratório de Sedimentos, está disponível a infra-estrutura necessária para a manipulação das amostras coletadas do material desagregado, para as peneirações úmida e seca das amostras e para as análises complementares.

a.- Canal de declividade variável

Foi construído para desenvolver este estudo, um canal metálico sustentado por uma estrutura construída com perfis em U e fixada em uma base de concreto construída no piso do Pavilhão Fluvial do IPH-UFRGS. O conjunto é capaz de suportar, quando o canal está em operação, um peso, aproximado, de 2,5 toneladas. O canal foi projetado para que pudesse ter a sua declividade alterada de 1,0 a 12,0% de forma fácil, rápida, segura e dependendo da ação de duas pessoas (Figura 4.1.). As variações de declividade são obtidas pelo movimento do pistão de um macaco hidráulico situado na parte inferior do canal e a vazão é controlada por um medidor eletromagnético.

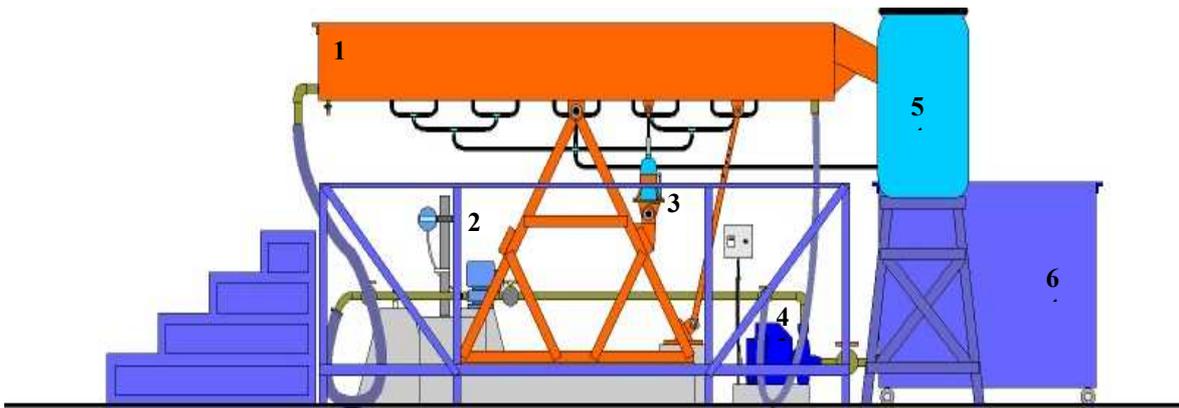


Figura 4.1. – Ilustração do conjunto experimental planejado e construído e da plataforma de acesso para as avaliações e leituras durante cada evento, sendo: 1.- Canal de declividade variável; 2.- Medidor de vazão; 3.- Macaco hidráulico; 4.- Bomba; 5.- Tanque de alimentação para a saturação e 6. Reservatório.

O canal apresenta as seguintes dimensões: 4,50m de comprimento, 0,74m de largura e 0,40m de profundidade, sendo que os primeiros 0,50m constituem a Cuba-II de tranquilização do escoamento, e os 0,50m finais são destinados para a Cuba-I, onde são coletados os sedimentos gerados em cada evento e injetada água para o processo de enchimento lento do canal por jusante, afim de evitar induzir movimento das partículas de solo (Figura 4.2.). Desta forma, restam 3,50x0,74x0,20m de área efetiva de trabalho. Esta área de 4,44m³ constitui o maciço de solo que foi dividido em uma zona de transição (junto à Cuba-II) e seis faixas efetivas de avaliação dos processos que se desenvolvem sobre o maciço de solo.

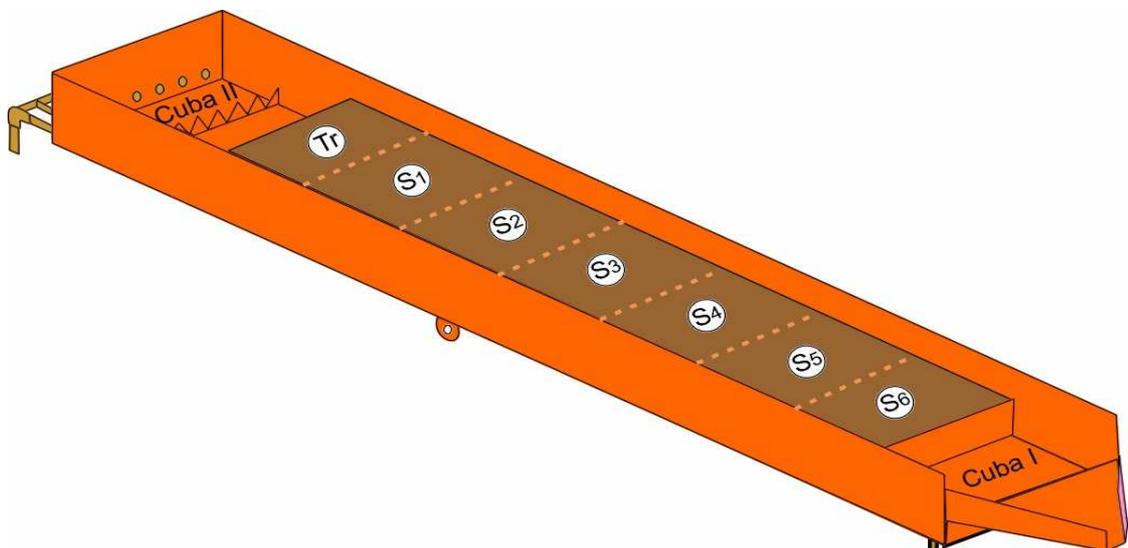


Figura 4.2. – Ilustração mostrando a posição do maciço de solo no interior do canal de declividade variável, as duas cubas, a zona de transição e as diferentes seções de avaliação (S₁, S₂, ... S₆) dos processos de erosão e deposição.

Nas bordas do canal, na região efetiva de trabalho, foram marcadas as seis faixas retangulares (0,50x0,74m) para facilitar o processo de documentação de cada ensaio (fotos

e/ou filmagem) e marcação dos referenciais para as medidas de velocidade superficial e das alturas de lâmina do escoamento.

Na base do canal, existem 25 pontos de entrada e/ou saída de água que permitem a saturação do maciço de solo, antes de cada evento, e a saída da água (drenagem livre) durante a realização dos diferentes eventos (Figura 4.3., detalhe). O canal apresenta além da área central, onde é colocado o maciço de solo, duas cubas. A Cuba-I, localizada junto à saída de água do canal, é o local onde são retidos os sedimentos gerados em cada um dos eventos e onde é injetada a água para o processo de “afogamento” do canal. A Cuba-II é o local onde ocorre a tranquilização do escoamento antes de alcançar a primeira seção do maciço (Transição - Tr).



Figura 4.3. – Vista geral do canal de declividade variável, da posição do simulador de chuva, das demais instalações experimentais e detalhe da forma de fixação e conexão das mangueiras no fundo do canal.

Antes da colocação do solo, sobre o fundo do canal experimental foi colocado um filtro de proteção formado por camadas de pedra brita envolta em um tecido leve e poroso (voal). O objetivo da construção deste filtro foi evitar a obstrução dos drenos e/ou alimentadores, existentes no fundo do canal de declividade variável, durante os eventos realizados. O filtro é constituído, na sua base, por pedras de diâmetro aproximado de 2,0cm, sendo que os espaços existentes entre elas são preenchidos com pedra brita com diâmetro entre 0,5 e 1,0cm.

b.- Simulador de chuva

Logo após a colocação do solo, foram aplicadas chuvas simuladas diretamente sobre o maciço, através da utilização de um mini-simulador de chuvas de apenas um bico, semelhante ao desenvolvido por Asseline e Valentin (1993). A chuva é simulada pelo bombeamento de uma vazão constante até um aspersor fixado a um braço, cujo movimento pendular define a magnitude da superfície molhada. Quanto maior o ângulo do movimento pendular, maior a superfície molhada e menor a quantidade de água que precipita dentro da parcela alvo (SILVEIRA e CHEVALLIER, 1991). As intensidades variam entre 30,0 e 150,0mm.h⁻¹.

A estrutura que sustenta o aspersor é composta por uma armação metálica quadrada (1,0x1,0m) apoiada em quatro hastes de sustentação reguláveis (tipo torre). No centro da armação está fixado o aspersor, o qual está conectado, por um cabo elétrico, a uma maleta onde estão colocados os microprocessadores eletrônicos e o teclado de controle e de programação. A energia para este sistema eletrônico é obtida a partir de uma bateria de automóvel de 45,0 Ampères. O bico aspersor foi posicionado a uma distância de 2,50m acima da superfície do maciço, operando a uma pressão de saída no bico da ordem de 42,0N.m⁻².

A chuva aplicada teve a duração de 30minutos e uma intensidade de 60,0mmh⁻¹, o principal objetivo da sua realização foi a destruição dos torrões maiores e desta forma, uniformizar a superfície do maciço.

c.- Alimentação líquida e controle da vazão

A água que chega ao canal de declividade variável provém de um reservatório de nível constante que, por bombeamento, alimenta o modelo através de uma canalização de tubos PVC (Figura 4.4.-a). A água que escoar sobre o maciço de solo retorna para diretamente para o reservatório, sendo que o reservatório de alimentação é limpo e a água renovada.

O sistema montado para controlar e aferir a vazão de alimentação do canal de declividade variável é composto por duas partes, ou seja, o medidor de vazão propriamente dito e o indicador da vazão, apresentadas na Figura 4.4.-b e c.

O medidor eletromagnético de vazão utilizado foi o modelo 570TM - Medidor, produzido pela Fisher-Rosemount do Brasil. O seu princípio de funcionamento é baseado na Lei de Faraday, segundo a qual um objeto condutor que se move em um campo magnético, gera uma força eletromotriz. No Medidor Eletromagnético, o condutor é o fluido que passa através do tubo detector. Desta forma, a direção do campo magnético, a vazão e a força eletromotriz estão posicionadas uma em relação a outra de um ângulo de 90°. O modelo 570TM apresenta cinco versões de medidores de vazão cuja vazão mínima medida varia entre 0,1435 L.min⁻¹ e 2297L.min⁻¹.

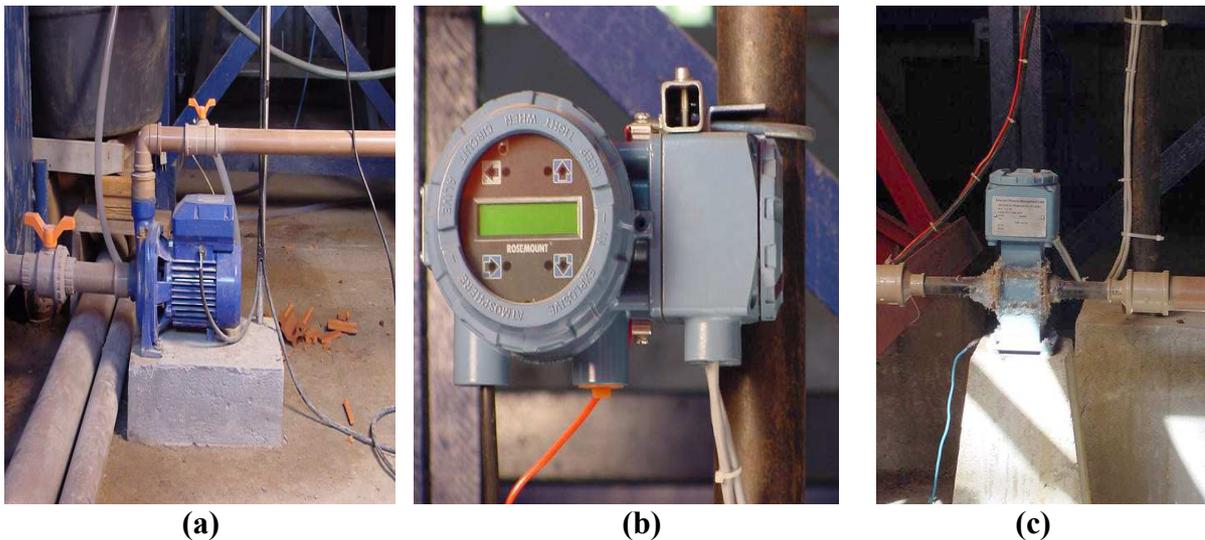


Figura 4.4. – Bomba que alimenta o modelo (a), *display* de cristal líquido do transmissor de dados (b) e o medidor eletromagnético de vazão modelo 570TM da Fisher-Rosemount (c).

O transmissor de dados acoplado ao medidor magnético de vazão utilizado foi o modelo 8732C produzido pela Rosemount. O transmissor apresenta uma interface com o operador local (IOL) que contém um *display* de cristal líquido com duas linhas de dezesseis caracteres que é iluminada por trás e visível de qualquer ângulo. Este display usa interruptores ópticos que detectam o toque de um dedo no vidro da IOL. Através da IOL, o operador pode acessar qualquer função do transmissor para mudar os ajustes do parâmetro de configuração, verificar valores totalizados ou outras informações.

d.- Rugosímetro

Nos testes iniciais para a leitura da rugosidade superficial da superfície do maciço foi utilizado um rugosímetro. O equipamento é constituído por uma chapa de acrílico de 0,80x0,50m. Esta chapa tem parafusado, na sua base, um perfil de alumínio que funciona como guia para que possam deslizar as hastes plásticas ou de metal, em número de 32 e com espaçamento de 2,0cm, permitindo a leitura das variações na superfície do maciço, em uma escala milimétrica fixada na chapa de acrílico.

As hastes descem e tocam o solo e são mantidas na sua posição aumentando-se a pressão que o perfil de alumínio faz contra as hastes, para que isso ocorra são utilizados três parafusos do tipo borboleta dispostos de forma equidistante na porção mediana do perfil de alumínio.

Concluído o processo de posicionamento das hastes e a sua fixação. A etapa seguinte, é a realização da leitura propriamente dita, que consiste na retirada do conjunto para uma

mesa de apoio lateral, na escala milimétrica a posição de cada uma das hastes é observada e anotada na planilha de trabalho.

e.- Leitor ótico de rugosidade

O leitor de rugosidade superficial é capaz de fornecer informações que permitem gerar ao final de cada uma das varreduras, por exemplo, no programa computacional SURFER® um mapa com as elevações superficiais de uma determinada região, conforme o espaçamento escolhido.

Este tipo de equipamento pode ser utilizado para digitalizar superfícies onde o detalhamento exigido é alto. Desta forma, são extremamente úteis para documentar os processos de desagregação de partículas sólidas e transporte de sedimentos envolvidos na erosão do solo, especialmente, nas suas duas fases principais: a erosão em entressulcos e a erosão em sulcos; desta forma, é possível fazer um detalhamento mais completo dos seus sub-processos.

No caso deste estudo, foi necessário coletar os dados referentes às mudanças ocorridas na superfície do maciço de solo antes e depois da aplicação dos testes de chuva simulada para a uniformização da superfície do solo e da passagem das cinco vazões crescentes e sucessivas. A superfície do solo que constitui o maciço foi descrita de acordo com a cronologia do preparo de cada ensaio, ou seja, após a moldagem do maciço de solo no interior do canal de declividade variável, após a chuva simulada para a uniformização da superfície do solo e logo após cada um dos quinze eventos.

A avaliação/varredura foi realizada através da utilização do leitor de rugosidade superficial. O sistema é composto de um sensor laser para fazer a descrição da superfície do solo, acoplado a um *Datalogger* destinado à acumulação das informações lidas pelo sensor, sendo que estes dois componentes do sistema estão ligados a um *Laptop*, onde as informações são salvas e, posteriormente, enviadas para o programa computacional Surfer® que faz a descrição tridimensional da superfície do maciço de solo em cada uma das condições trabalhadas (Figura 4.5.).

As leituras foram realizadas linha por linha, de forma seqüencial. Cada linha apresentava uma largura aproximada de 0,64m (eram mantidos pelo menos 0,05m de distância de cada uma das bordas do canal experimental para a segurança do equipamento), o espaçamento entre cada uma delas foi em torno 8,0mm, o número de pontos em cada linha, normalmente empregado, foi de 700 e o comprimento de cada um desses mapas ficou entre 1,0 e 3,5m.

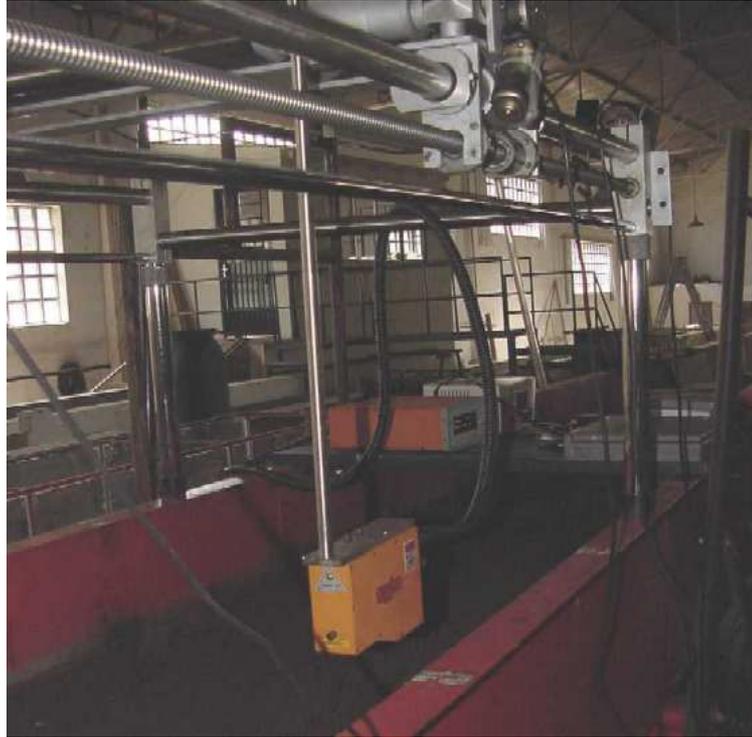


Figura 4.5. – Sistema laser de medição de rugosidade superficial, em primeiro plano o sensor laser e ao fundo *laptop*, *datalogger* e fonte de energia.

4.3.- Solo

A escolha do local para a coleta do solo que constitui o maciço, a ser colocado no interior do canal de declividade variável, foi realizada tendo como o principal critério ser um solo com alto teor de argila. Os demais critérios foram ser proveniente de um local com importância na produção agrícola do Estado do Rio Grande do Sul, que apresentasse um histórico e/ou origem conhecida e que o local escolhido apresentasse uma relativa facilidade de coleta e de transporte para Porto Alegre. Portanto, o local escolhido foi o município de Passo Fundo.

a.- Local de coleta

O solo colocado no canal de declividade variável e utilizado para a realização dos diferentes ensaios, foi coletado no município de Passo Fundo, Estado do Rio Grande do Sul, na latitude de 28°3'sul, longitude 54°4'oeste, em uma altitude de 687,0m acima do nível do mar. O município está localizado na região fisiográfica do Planalto Médio, sendo que o relevo é ondulado a suave ondulado, formado por elevações com longas pendentes criando depressões fechadas (coxilhas). O clima da região é do tipo Cfa, conforme classificação de Köppen, subtropical úmido com chuvas bem distribuídas durante todo o ano.

O solo da área é um Latossolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 1999), solo profundo, homogêneo, altamente intemperizado, originado a partir do Basalto, cor vermelha predominando no horizonte B e saturação de bases inferior a 50%.

Na descrição realizada por Streck *et al.* (2002), é referido que em função das suas propriedades físicas (profundidade, boa drenagem, alta porosidade, friáveis e bem estruturados) e das condições de relevo suave ondulado, os Latossolos, de uma maneira geral, possuem uma boa aptidão agrícola, desde que sejam corrigidos os seus problemas de fertilidade, uma vez que respondem bem à aplicação de fertilizantes e corretivos.

A coleta do solo foi realizada na área do Aterro Sanitário do município de Passo Fundo, próximo da rodovia RS-324 que liga as cidades de Passo Fundo e Marau. Logo depois da saída da cidade de Passo Fundo, existe um Posto da Polícia Rodoviária Estadual, passando este posto e seguindo até o km 107 da rodovia segue-se por uma estrada municipal que conduz ao distrito de São João da Boa Vista. Após percorrer um distância aproximada de 1500m encontra-se o portão de acesso ao Aterro Sanitário Municipal.

A coxilha escolhida apresentava vegetação rasteira composta, especialmente, por gramíneas. Além disso, era possível encontrar arbustos de porte médio. O preparo da área para a coleta começou com a retirada da cobertura vegetal da superfície do solo com o uso da “concha” de uma retro-escavadeira. Concluída a fase de limpeza da área, foram retirados apenas os primeiros 0,20m do horizonte A do perfil de solo. A quantidade de solo coletada foi de 5,0 toneladas que foram transportadas para o Pavilhão Fluvial, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, onde foi desenvolvido todo o trabalho experimental.

No Campus do Vale da UFRGS, no Instituto de Pesquisas Hidráulicas, o solo foi descarregado e colocado no interior de uma caixa de madeira (4,0x4,0x1,0m), revestido no fundo e nas laterais com lona plástica. Um dos lados desse quadrado é aberto, sendo que esta abertura está voltada para a porta do Pavilhão Fluvial, favorecendo desta forma a retirada do material e a sua condução para o interior do prédio. Além disso, permite a abertura da lona plástica para a secagem do material nos dias ensolarados.

b.- Preparação do solo para os ensaios

Por um período aproximado de um mês, após a chegada do solo ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, a lona plástica foi aberta todos os dias para permitir a secagem do solo e facilitar o seu transporte para o interior do Pavilhão Fluvial. Decorrido este período, o solo foi colocado dentro do Pavilhão Fluvial sobre um estrado de 4,0x3,0m formando uma camada de aproximadamente 0,20 a 0,25m que facilitou o seu o seu revolvimento, a quebra dos torrões maiores e secagem.

No momento em que se percebeu que foi atingido o ponto de friabilidade, começou o transporte do solo para o interior do canal de declividade variável. Desta forma, foi possível observar a granulometria do material que estava sendo colocado no interior do canal. Por ocasião da retirada do solo da superfície do estrado, já se fez uma seleção prévia do material que era colocado no interior dos baldes, ou seja, evitando-se os torrões maiores que 2,0/3,0cm. Desta forma, foi possível manter uma uniformidade do material que iria formar o maciço de solo, desde a sua base até a camada superficial.

As camadas de solo foram colocadas até atingir a altura de 0,20m em um compartimento com 3,5m de comprimento no interior do canal, delimitado, tanto na extremidade de entrada de água como na de saída, por chapas metálicas medindo 0,74x0,20m. A superfície do solo foi nivelada com o uso de uma guia de madeira posicionada transversalmente ao sentido do comprimento do maciço e colocada a 0,20m de altura, medidos a partir do fundo do canal

Portanto, cada uma das metades da superfície do solo foi nivelada separadamente sendo que após a conclusão do trabalho em cada uma delas foi removida a guia e reconstituída essa região central do maciço. Durante o processo de nivelamento foi realizado um controle visual do material que ficava na superfície do maciço. Desta forma, alguns daqueles torrões que dificultavam a passagem da régua e o nivelamento superficial foram removidos.

c. Caracterização sedimentométrica, física e química do solo colocado no canal

A curva granulométrica dos agregados do solo seco é apresentada na Figura 4.6. e algumas das suas características físicas e químicas do solo, coletado em Passo Fundo/RS, podem ser observadas na Tabela 4.2.. Observa-se que, portanto, que o d_{50} é de 3,85mm, o d_{90} é 8,65mm, o d_{10} é de 0,24mm e o coeficiente de uniformidade, obtido pelo quociente entre o d_{60} e o d_{10} , é de 20,4. Além disso, é possível perceber que os diâmetros dos agregados que compuseram o maciço de solo variaram da faixa de cascalho até argila. A presença de cascalhos (médios e finos) é de 67,0%, das areias (grossa, média e fina) é de 31,0% e do silte (grosso e médio) e da argila é de 2,0%.

É importante ressaltar a alteração que ocorre na distribuição das diferentes frações granulométricas quando a amostra do solo, que constitui o maciço, foi fracionada via peneiração úmida (conforme o Método do Hidrômetro). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.2.1.. Os valores demonstram que predomina a fração fina, especialmente, argila, com um teor em torno de 70,0%, indicando que o maciço moldado no

interior do canal é formado por um solo que apresenta alta área superficial específica e coesão.

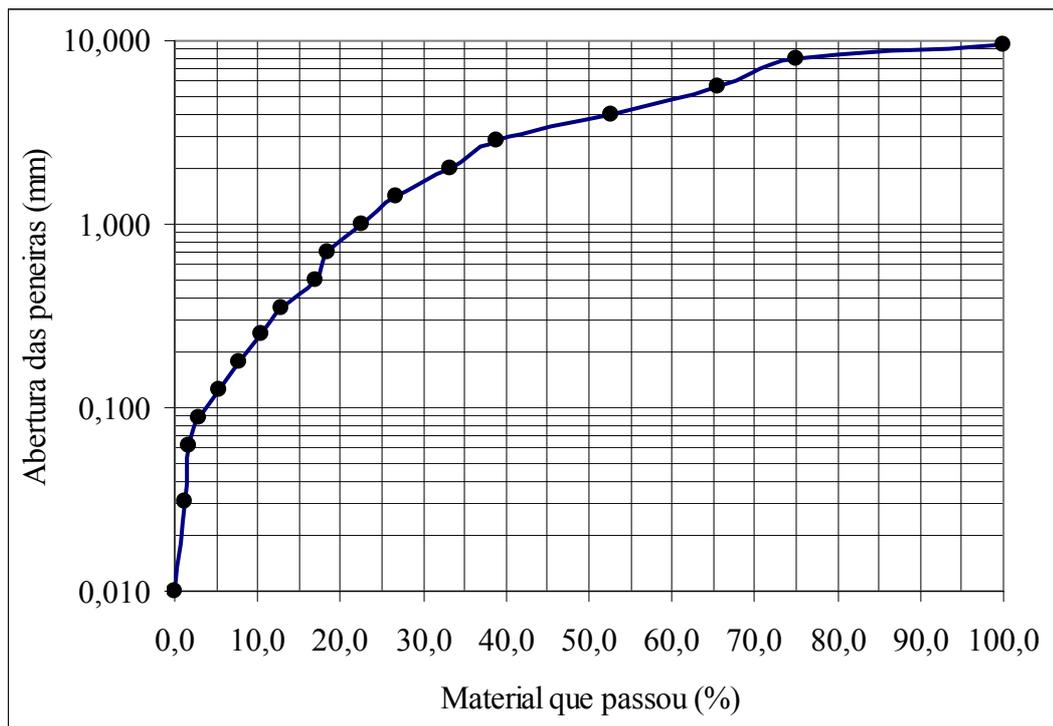


Figura 4.6.- Curva granulométrica do solo colocado no interior do canal e que constituiu o maciço de solo submetido a ação das cinco vazões crescentes e sucessivas.

Tabela 4.2.- Características físicas e químicas do solo coletado, no campo, em Passo Fundo para os ensaios e dos solos arenosos da Estação de Pesquisa da FEPAGRO (Santa Maria/RS) e Estação Agrônômica da UFRGS (Eldorado do Sul/RS).

Característica do solo	Unidade de expressão	Aterro Sanit. Passo Fundo	FEPAGRO Santa Maria	UFRGS Eldorado
Areia (0,050 – 2,00 mm) ¹	g.kg ⁻¹	289	755	616
Silte (0,002 – 0,050 mm) ¹	g.kg ⁻¹	113	101	171
Argila (< 0,002 mm) ¹	g.kg ⁻¹	598	144	213
d ₅₀ das partículas do maciço	mm	3,85	---	---
Densidade do solo ²	Mg.m ³	1,29	1,51	1,24
Densidade de partícula ²	Mg.m ³	2,58	2,65	2,56
Teor de Matéria Orgânica ³	g.kg	3,6	1,02	1,8
pH em água ³	-	4,8	4,5	4,9
Capacidade de Troca de Cátions ³	cmol _c .L ⁻¹	14,4	3,8	5,4
Teor de Alumínio ³	cmol _c .L ⁻¹	2,5	0,6	0,6
Teor de Cálcio ³	cmol _c .L ⁻¹	2,1	1,2	2,3
Teor de Manganês ³	cmol _c .L ⁻¹	1,7	0,6	0,7

¹- Valores obtidos utilizando o Método do Hidrômetro descrito em Cauduro e Dorfman (1988).

²- Embrapa (1979).

³- Tedesco *et al.* (1995).

4.4.- Tratamentos e Procedimento experimental

Os diferentes tratamentos foram avaliados a partir do desenvolvimento do procedimento experimental planejado. Estando o maciço formado e com a sua superfície nivelada, foi realizada uma chuva simulada para uniformizar o tamanho dos agregados superficiais. Logo em seguida, o maciço de solo foi saturado, durante uma noite, e a rugosidade foi avaliada com o uso do perfilômetro.

O ensaio propriamente dito foi composto pelos seguintes procedimentos experimentais e determinações: estabelecimento da vazão de trabalho, fixação da declividade do canal, avaliações da velocidade superficial com traçador, leitura da profundidade do escoamento com a ponta linimétrica e quantificação da desagregação provocada pela passagem do fluxo através de coletas do material desagregado e transportado que chegou até a Cuba-I e nos potes.

a.- Tratamentos

A estrutura experimental construída e operada no Laboratório de Processos Erosivos e Depositionais no Pavilhão Fluvial-IPH, possibilitou a condução deste estudo, onde foram executados seguinte tratamentos:

- Aplicação de diferentes vazões (descarga líquida), controladas através do uso de um medidor eletromagnético, de 10,0; 18,5; 25,5; 38,5 e 51,0 Lmin⁻¹; e
- Alteração das declividades do canal experimental, controladas através, de um nível eletrônico digital, de 3,0; 6,0 e 9,0%.

b.- Saturação do maciço de solo

O canal de declividade variável permite que, através de um sistema de mangueiras colocadas na sua parte inferior, seja possível injetar e/ou retirar água do interior do maciço de solo. Portanto, um dia antes de cada um dos eventos de chuva simulada foi realizada a saturação do maciço de forma lenta e gradual, uma vez que as mangueiras estavam conectadas a um tanque de alimentação, com capacidade de 200litros, no qual o nível de água era mantido constante.

Os incrementos no nível de pressão de água agindo sobre o maciço, foram de 3,0cm em intervalos aproximados de 1,0 a 2,0horas e, assim, prosseguiram até que fosse atingido 15,0cm de lâmina de água no interior do maciço. Essa condição permaneceu por uma noite. Nas primeiras horas da manhã do dia seguinte, prosseguiu-se elevando o nível de água até atingir os 0,20m no mesmo ritmo do dia anterior, ou seja, até se perceber um filme de água na superfície do solo que formava o maciço.

c.- Avaliação da rugosidade superficial e distribuição dos sedimentos

A rugosidade afeta os diversos processos que ocorrem na superfície do solo, tais como a infiltração de água, quantidade de água armazenada nas depressões, o impacto das gotas de chuva, o escoamento superficial, o transporte de sedimentos e a sua deposição, ou seja, o processo erosivo como um todo.

Os equipamentos empregados para esta avaliação foram o rugosímetro, utilizado logo após a aplicação da chuva simulada e de cada uma das vazões, e Leitor ótico de rugosidade superficial que fez a varredura depois da aplicação da última vazão, para realizar um mapeamento detalhado da superfície do maciço. A partir do momento em que os dados estão armazenados em um *Laptop*, começa a fase de montagem das superfícies em um programa capaz de representar os pontos lidos de forma tridimensional. O programa computacional escolhido para a realização deste trabalho foi o Surfer[®].

Os dados referentes às diferentes alturas medidas pelo Rugosímetro ou do sistema ótico de leitura de rugosidade superficial foram primeiramente transferidos para as planilhas eletrônicas, onde foram detalhadas as informações referentes aos eixos x, y e z. O passo seguinte, foi gerar as superfícies tridimensionais no programa computacional Surfer[®].

d.- Preparo do ensaio

Concluída a saturação do maciço de solo, na manhã seguinte, foi estabelecido o horário para o início do ensaio. Uma hora antes do horário fixado, foi liberada a mangueira de alimentação, conectada nos orifícios dispostos na base do canal e, teve início o processo de drenagem livre. Os preparativos finais consistem na verificação das peneiras de retenção de sedimentos localizadas sobre o reservatório principal (malhas 0,062 e 0,037mm), no posicionamento dos potes de coleta na seqüência correta, no acompanhamento visual da drenagem do maciço, no posicionamento das pontas linimétricas e, por fim, no ajuste e na retirada da comporta colocada próximo ao bico do canal (na Cuba-I) para facilitar o processo de enchimento do canal.

Decorrido o período de uma hora em que o canal permanece em drenagem livre, teve início o processo de enchimento do canal. O primeiro passo, foi abrir o registro de alimentação instalado no fundo do canal (Figura 4.1.), para que a Cuba-I fosse enchendo lentamente (Figura 4.2.). Conforme a água foi subindo no interior da Cuba-II, a abertura do registro foi sendo controlada para que a entrada de água no canal e a sua passagem para a superfície do maciço de solo fosse tranqüila e não provocasse nenhum tipo de perturbação na superfície do solo.

Enquanto a frente de umedecimento avança sobre o maciço, o registro que alimenta a Cuba-II foi aberto para que a altura da lâmina de água se eleve até, aproximadamente, 0,18 ou 0,19m (Figura 4.2.). Logo em seguida, o registro foi desligado e se aguardou a chegada da frente de umedecimento na porção final do maciço de solo e a sua passagem para a Cuba-II. Durante este procedimento, o canal estava com uma inclinação de 0,2 a 0,5%. Desta forma, quando a Cuba-II estivesse completamente cheia, a tendência do escoamento seria inverter o fluxo. Durante o processo de elevação do nível na Cuba-II, foi colocado um termômetro para determinar da temperatura da água durante o evento.

A partir deste instante, foi fechada a alimentação da Cuba-I e aberto o registro que alimentava a Cuba-II, para que se pudesse, o mais rápido possível, ajustar a vazão de trabalho. Neste mesmo momento, já tinha sido realizada a retirada, com o máximo de cuidado, da comporta que estava colocada na Cuba-I. Concluída esta fase, foi esperado o tempo necessário para que o escoamento possa se estabilizasse e teve início a etapa de colocação do canal na inclinação desejada.

A etapa de inclinação do canal foi crítica, uma vez que é fundamental que não fosse perturbada a superfície do maciço de solo e que, desta forma, não ocorresse movimentação no fundo, garantindo-se a condição da rugosidade superficial existente antes da entrada de água no canal. Portanto, esta etapa deveria ser realizada com a maior lentidão e segurança possível (para atingir a declividade máxima o tempo decorrido ficou em torno de 10 a 15 minutos).

Enquanto um dos operadores abaixava o canal, o outro controlava a descida utilizando um nível eletrônico e ajustava um anteparo, colocado próximo da chapa metálica, existente entre a Cuba-I e o maciço, para evitar a passagem de material para a cuba de coleta antes que a declividade de trabalho estivesse estabelecida de forma correta.

Acertada a declividade de trabalho e confirmado o ajuste e a manutenção da vazão, foi possível dar início ao ensaio, com duração de 40 a 60 minutos dependendo da vazão e da declividade adotadas. A duração do ensaio foi definida em função da observação do movimento das partículas de solo, ou seja, a partir do momento em que não se observava modificações no fundo e que a velocidade do escoamento superficial permanecia constante, o ensaio era finalizado.

e.- Avaliação da velocidade superficial

A velocidade pode ser medida através do uso de flutuadores, traçadores, molinetes e por meio de métodos que utilizam princípios óticos ou que empregam laser e ultrassom. Para estudos de laboratório, por exemplo, podem ser empregados tanto os tubos de pitot como os métodos óticos.

Durante cada um dos eventos após o escoamento estar estabelecido, ou seja, estabilizado para aquela declividade de trabalho, foram realizadas, em locais previamente estabelecidos (seções) e em intervalos regulares, as medições da velocidade superficial do escoamento através do uso de traçador (azul de metileno). Os locais escolhidos para identificar o início da passagem do traçador (liberação do cronômetro) e o final da passagem do traçador foram as marcas existentes na borda do canal para identificar as diversas seções de controle. O intervalo entre cada uma das avaliações foi em torno de cinco minutos. Desta forma, no final de cada um dos ensaios foram realizadas pelo menos doze leituras de velocidade.

f.- Profundidade do escoamento superficial

Nas bordas do canal experimental foram marcadas seções de controle espaçadas de 0,50m ($S_1, S_2, \dots S_6$). Nesses pontos foram realizadas as leituras de altura de lâmina através do uso de ponta linimétrica, determinando-se a posição média da superfície livre. Este equipamento é construído com uma escala graduada ligada a uma ponta afilada, que toca diretamente a lâmina de água em escoamento ou a lâmina de água em um atenuador de nível (copo) ligado à parede do canal. Quando usada em escoamentos que transportam sedimentos e ocorrem em fundo móvel, a forma mais adequada de realizar a leitura é através do contato direto da ponta linimétrica com a superfície da água em escoamento.

Nas seções marcadas previamente, se escolheu o local onde havia uma maior profundidade, cujas coordenadas (x,y) do ponto foram levantadas para permitir a realização de medidas em intervalos de cinco a dez minutos. Assim, foram posicionadas as linhas de água do escoamento em seis seções transversais do canal.

Deve ser ressaltado que, após a realização de cada um dos ensaios, não só a posição da linha de água era determinada, mas, também, em cada uma das seções, realizava-se uma leitura referente à cota do fundo para avaliar o resultado final da passagem de uma determinada vazão em uma dada declividade.

g.- Quantificação das taxas de desagregação do solo

As taxas de desagregação do solo foram obtidas a partir do solo coletado no bico de saída do canal e acondicionado em potes plásticos com capacidade de 920ml em intervalos que variaram de 5,0 em 5,0 minutos durante o evento. A duração das coletas foi de 5,0; 3,0 e 2,0 segundos, variando de acordo com as vazões aplicadas.

Após a pesagem dos potes foi adicionado 3,0ml de Alúmem de Potássio a 4,0%, para facilitar a deposição das partículas finas. Após 24 horas, o sobrenadante foi succionado e os

potes colocados na estufa a uma temperatura de 45/50°C durante um período de 72 horas. Decorrido esse período, os potes com solo seco foram pesados, lavados, secos e pesados novamente, para a determinação da massa de água e de solo seco. A partir dos dados de concentração de sedimento, de vazão e do tempo decorrido entre as amostragens foi calculada a perda de solo, ou seja, o material que foi perdido via extremidade da Cuba-I.

h.- Quantificação das perdas totais de solo

Após a finalização de cada evento, o material que ficou retido na Cuba-I foi coletado e conduzido para ser analisado no Laboratório de Sedimentos/IPH. O primeiro passo para a coleta, é a manutenção do canal em drenagem livre para que durante um período de 8 a 12 horas, para que a água possa sair da Cuba coletora deixando que ali permaneçam apenas o material transportado. Decorrido esse período de tempo, o material mais grosso é retirado com uma pá e colocado em um balde. No final, permanece sobre a peneira apenas o sedimento de menor diâmetro, que deverá ser retirado com pá e com o auxílio de jatos de água.

Concluída esta etapa, resta no fundo da Cuba-I o material de granulometria mais fina junto com a água utilizada na limpeza da Cuba. Para a retirada do restante do material é necessário colocar um balde coletor embaixo do canal e abrir a saída de água existente junto ao fundo na Cuba-I. Desta forma, será possível retirar toda a mistura “água + sedimentos” que ainda restava na Cuba. Uma vez que o volume de água utilizado no processo de limpeza da cuba coletora é relativamente grande, são coletados vários baldes, os quais são levados para o Laboratório de Sedimentos, onde teve início o processo de precipitação das partículas finas. A massa de solo retida na Cuba-I foi adicionada à massa de solo que foi quantificada como sendo o material perdido pela extremidade da Cuba-I, resultando na perda total de solo em cada um dos eventos.

i.- Diâmetro das partículas do material desagregado e transportado

Após o término de cada um dos eventos, durante a limpeza da Cuba-I, foi coletada uma amostra do material que ficou retido, com um peso aproximado de 0,10/0,15kg. Para a formação desta amostra composta, foi utilizado um balde plástico, no qual se procurou colocar uma quantidade de material que fosse suficiente para que todas as frações granulométricas presentes na Cuba-I estivessem incluídas nesta amostra composta.

Esta amostra de solo foi utilizada para a avaliação da distribuição de tamanho das partículas do material transportado pelo escoamento superficial. O procedimento de análise foi realizado no Laboratório de Sedimentos/IPH através do processo de peneiração úmida,

sendo que as partículas foram separadas em oito diferentes classes de tamanho e realizadas três repetições para o material coletado em cada ensaio.

As malhas das peneiras utilizadas apresentavam os seguintes diâmetros: 4,76; 2,00; 1,00; 0,50; 0,210; 0,106 e 0,053mm. As peneiras com diâmetro de malha igual ou superior a 0,210mm foram agitadas mecanicamente durante um período de 10 minutos. Entretanto, o material que passou na peneira com malha de 0,210mm foi separado pelo processo de peneiração manual, ou seja, o material que passou pelas duas peneiras (0,106 e 0,053mm) foi coletado em um recipiente fechado, evitando assim que parte da amostra fosse perdida. Esse material coletado após a peneiração manual, com diâmetro inferior a 0,053mm, foi colocado em um copo de becker de um litro e adicionado Alúmen de Potássio a 4,0% para facilitar o processo de sedimentação das partículas. O material que foi separado via peneiração úmida foi colocado na estufa a 105°C.

A fração de partículas em cada uma das classes de tamanho foi calculada dividindo-se a massa de partículas secas, em uma determinada classe, pela massa total de solo seco da amostra peneirada. Os resultados foram expressos em termos de percentagem.

Com base nos dados de distribuição de tamanho de partículas foi calculado o índice d_{50} , ou seja, um indicador do diâmetro médio das partículas, onde 50% delas em peso são maiores e 50% menores. Além deste índice foram calculados alguns outros, tais como d_{10} , d_{50} , e d_{65} .

j.- Características hidráulicas do escoamento nos sulcos

Para fazer a caracterização da geometria da seção transversal ao longo do canal, foi realizado um levantamento do fundo após a passagem de cada uma das vazões, o que permitiu a determinação das cotas da seção transversal. A posição da linha de água foi estabelecida a partir da leitura da profundidade do escoamento no talveg (nos últimos quinze minutos de ensaio) acrescentando-se ao valor a cota de fundo no local.

Após a obtenção das informações da cota de fundo e da posição da linha de água para cada seção, foi plotado, no programa Excel[®], um gráfico posicionando, ao longo da seção transversal do canal, as cotas do fundo do maciço de solo e as cotas da linha de água, esses dados estão apresentados no Anexo II. Depois de imprimir um gráfico para cada seção, vazão e declividade foi calculada a área molhada (A), utilizando-se o método das pesagens. Além disso, nos gráficos foi medida a largura do escoamento superficial.

Para a obtenção dos valores referentes ao perímetro molhado e ao raio hidráulico, a seção foi suposta como sendo retangular, pois a largura da seção é predominante sobre a profundidade. De tal forma que:

$$P_m = b + 2.h \quad [4.1]$$

onde: P_m é o Perímetro molhado da seção, expresso em m; b é a largura do escoamento, em m (obtida no gráfico do programa Excel[®]) e (h) é a profundidade média da seção, calculada pelo quociente A/b e expressa em m.

O cálculo do Raio hidráulico (R_H) foi realizado com base na seguinte expressão:

$$R_H = \frac{A}{P_m} \quad [4.2]$$

onde: R_H é o Raio hidráulico, expresso em m; A é a área da seção, expressa em m^2 e P_m é o Perímetro molhado da seção, expresso em m.

Depois de obtidas as características geométricas das seções, a caracterização das condições hidráulicas do escoamento nos sulcos gerados no interior do canal de declividade variável, a partir do incremento das vazões, foi realizada priorizando os seguintes parâmetros hidráulicos:

- a) número de Reynolds (R_e) calculado através da expressão [3.5];
- b) número de Froude (F_r) calculado a partir da expressão [3.6];
- c) número de Reynolds do grão (R_e^*) obtido através da expressão [3.10]; e
- d) velocidade de cisalhamento do grão (u_*). Sendo que a velocidade de cisalhamento do grão é dada pela seguinte expressão:

$$u_* = \sqrt{g.h.s} \quad [4.3]$$

onde: g é a aceleração da gravidade, dada em $m.s^{-2}$; h é a altura de lâmina do escoamento, expressa em m e s é a declividade em $m.m^{-1}$.

Para o cálculo do número de Reynolds, foi necessário calcular a viscosidade cinemática (ν) da água que escoou sobre a superfície do maciço de solo durante os diferentes eventos realizados, a qual varia em função da sua temperatura. Por isso, durante a realização de cada ensaio, foi avaliada a temperatura da água ($^{\circ}C$), através do uso de um termômetro colocado na zona de tranquilização (Cuba-II). A viscosidade cinemática, expressa em $m^2.s^{-1}$, foi calculada em função da temperatura da água através da seguinte expressão:

$$\nu = \frac{1,78 \times 10^{-6}}{1 + 0,0337.T + 0,000221.T^2} \quad [4.4]$$

onde: T é a temperatura da água expressa em $^{\circ}C$.

A resistência à passagem do escoamento foi calculada através do fator de perda de carga de Darcy-Weissbach (**f**) com base na expressão [8] e também pelo coeficiente de rugosidade de Manning (**n**), através da expressão:

$$n = \frac{R_H^{2/3} \cdot I^{1/2}}{\bar{V}} \quad [4.5]$$

onde: **R_H** é o Raio hidráulico dado em m; **I** é a declividade expressa em m.m⁻¹ e \bar{V} é a velocidade média do escoamento, expressa em m.s⁻¹.

A tensão de cisalhamento (**τ**), foi calculada através da expressão [3.4] e a potência do escoamento (**Ω**) foi calculada pela expressão [3.19].

Etapa II - Estudo do desenvolvimento de sulcos de erosão em meio coesivo

A segunda etapa do trabalho consistiu na combinação dos dados obtidos na Etapa I, para os diversos parâmetros hidrossedimentométricos, procurando compreender como ocorreu a incisão e o posterior desenvolvimento do(s) sulco(s) de erosão em meio coesivo. Além disso, buscou-se identificar as diferentes fases evolutivas do(s) sulco(s) e definir qual dos parâmetros hidráulicos estudados poderia ser capaz de fazer a separação entre cada uma dessas fases.

4.5.- Identificação das etapas de formação dos sulcos

A partir da combinação criteriosa dos vários tipos de informações tanto quantitativas como qualitativas, obtidas durante a realização dos ensaios no canal, logo após o término de cada um deles e após a análise dos dados, foi montada uma proposta de seqüência evolutiva para sulcos, que se desenvolveram sobre o maciço de solo, como resultado da passagem das cinco vazões crescentes e sucessivas. O trabalho de análise e o estabelecimento de correlações entre os diferentes tipos de informações levantadas teve como base:

- 1.- a análise das fotos obtidas após a conclusão de cada um dos vários eventos, buscando a identificação de pontos de referência para fazer a separação entre cada uma das fases evolutivas;
- 2.- a avaliação das anotações realizadas durante os ensaios relativas à cronologia evolutiva dos processos de desagregação, transporte e deposição que se sucediam na superfície do maciço de solo;
- 3.- a comparação entre a imagem captada em cada uma das fotos e levantamento das dimensões dos sulcos tais como comprimento, largura e profundidade (apresentados no item 5.1.4.), realizado após a conclusão de cada ensaio;

- 4.- a integração das superfícies geradas pelo programa computacional Surfer® com os demais elementos de identificação das fases evolutivas dos sulcos de erosão;
- 5.- o cruzamento das várias informações referentes à velocidade do escoamento superficial, das alturas de lâmina do escoamento e evolução da descarga sólida dentro de cada uma das fases;
- 6.- a comparação dos elementos de identificação dos sulcos levantados nos itens anteriores com alguns resultados de trabalhos encontrados na literatura, especialmente, sobre o processo de incisão e evolução de sulcos em canais.

A busca das informações para elaborar a definição final das fases evolutivas dos sulcos se deteve com maior detalhe nas publicações daqueles centros e laboratórios de pesquisa internacionais que buscam a maior integração entre a Mecânica da erosão, a Mecânica fluvial e a Hidráulica. Cabe salientar que não existem muitos registros na literatura sobre o processo de incisão e de evolução dos sulcos em condições similares às nossas, tanto em termos de solo como de clima.

Na literatura internacional, a maior parte dos trabalhos é realizada em laboratório, sobre substratos de textura arenosa ou siltosa. A análise da seqüência de fases evolutivas dos sulcos de erosão foi realizada com base nos critérios propostos por Moss *et al.* (1982), Merrit (1984), Govers e Rauws (1986) e Torri *et al.* (1987), com algumas adaptações para as condições experimentais deste estudo.

Partindo dessas considerações, o processo de concentração dos escoamentos gerando sulcos foi dividido em diferentes fases evolutivas, definidas como segue:

- 1.- **Fase de pré-incisão** - caminhos preferenciais: o escoamento é difuso e fluxo encontra-se distribuído uniformemente sobre a superfície do maciço de solo. Há a ocorrência de erosão localizada, envolvendo apenas o movimento de grão individuais. Nesta fase, é possível perceber que o escoamento começa a se concentrar em diminutos canais em pontos aleatórios, fazendo com que ocorra elevação na altura de lâmina e redução da velocidade do fluxo devido ao aumento da rugosidade superficial;
- 2.- **Fase intermediária** - incisão e aprofundamento do sulco: aparecem os micro-canais. Os canais já estão bem definidos, embora ainda sejam muito pequenos, contudo, ainda não está presente o processo de erosão regressiva. Na etapa de aprofundamento, a erosão regressiva está presente, provocando incisão efetiva e alargamento do sulco recém formado;
- 3.- **Fase final** - sulco definido: etapa onde o processo evolutivo é mais acentuado. A erosão regressiva é intensa e provoca um aporte rápido de sedimento ao escoamento, especialmente, através do solapamento e a conseqüente queda do material das margens para o interior do sulco em evolução.

4.6.- Identificação do tipo de transporte

Foi utilizado o critério proposto por Raudkivi (1990) com o objetivo de identificar entre os diferentes tipos de transporte sólido possíveis (arraste, saltação ou suspensão) qual ou quais deles estariam atuando em cada uma dessas fases evolutivas dos sulcos de erosão.

O critério de identificação da modalidade de transporte, proposto define que:

$$\text{Transporte} = \frac{w}{u_*}$$

onde: w é a velocidade de queda das partículas transportadas pelo fluxo e u_* é a velocidade de cisalhamento.

Portanto, a separação entre as diferentes modalidades de transporte sólido foi realizada da seguinte maneira:

- 1.- **Transporte via suspensão:** se o resultado do quociente w/u_* for inferior ao valor de 0,60;
- 2.- **Transporte via saltação:** se o resultado do quociente w/u_* esteja entre 0,60 e 2,0;
- 3.- **Transporte por arraste:** se o resultado do quociente w/u_* estiver situado na faixa entre 2,0 e 6,0.

Entretanto, outros autores, tais como Leeder (1999), consideram que o índice de referência para separar a fase de saltação da fase de suspensão possa ser um maior, ou seja, alcançando o valor de 0,80. Portanto, valores de 0,6; 0,7 e 0,8 serão aqui considerados como sendo um misto do transporte via suspensão e via saltação.

4.7.- Identificação do tipo de partícula em transporte

A avaliação das características das partículas sólidas que estavam em suspensão na massa líquida, foi realizada separando tais partículas em pelo menos dois grupos, descritos logo abaixo.

Grupo 1: aquelas partículas mais leves, que poderiam ascender da superfície do maciço de solo e permanecer em suspensão na massa líquida por longo tempo;

Grupo 2: aquelas partículas mais pesadas que ascenderiam da superfície do maciço de solo e logo depois retornariam à superfície, permanecendo em suspensão por pouco tempo.

O critério encontrado para fazer esta separação entre esses dois tipos de partículas transportadas por suspensão, foi o critério proposto por Nezu e Nakagawa (1993). A aplicação deste critério é realizada a partir do cálculo do Fator R, obtido da seguinte forma:

$$FatorR = \frac{\left(\frac{w}{u_*} \right)}{\kappa}$$

onde: w é a velocidade de queda das partículas, expressa em $m.s^{-1}$; u_* é a velocidade de cisalhamento das partículas, expressa em $m.s^{-1}$ e κ é a constante de Von Karman, cujo valor é 0,41.

5. Resultados e discussão

Em um primeiro momento, neste tópico, serão apresentados os resultados obtidos na Etapa I, ou seja, com os dados levantados diretamente no canal, onde o processo de geração e desenvolvimento de sulcos de erosão foi avaliado a partir da quantificação dos parâmetros hidráulicos, da análise dos aspectos visuais da interação do escoamento superficial com o contorno sólido (meio coesivo), das superfícies tridimensionais geradas pelo programa computacional Surfer®, das medidas de concentração de sedimentos no fluxo (instantânea e acumulada), da granulometria do material coletado na Cuba-I e da perda de solo ocorrida nos diversos eventos.

Na segunda parte deste tópico, serão apresentados e discutidos os dados referentes à Etapa II, onde a ênfase foi discutir e analisar como ocorre o processo de formação dos sulcos de erosão em meio coesivo. A discussão começa com a separação das etapas evolutivas dos sulcos, passa pela busca, entre alguns parâmetros hidráulicos, daquele que melhor ajuda a separar cada uma das etapas e, por fim, mostra como se processou a dinâmica da evolução dos sulcos, através da identificação das modalidades de transporte ocorridas, da identificação da contribuição do transporte via fundo e via suspensão para a perda de solo total e da descrição da evolução espaço-temporal de um sulco sobre o maciço de solo argiloso, em um evento crítico. Também é traçado um paralelo entre a quantidade de material mobilizado sobre um maciço de solo argiloso e aquela gerada sobre solo de textura arenosa sujeitos à ação da potência do escoamento.

Etapa I – Geração de sulcos de erosão em meio coesivo, a partir da aplicação de vazões sucessivas e alteração na declividade

De acordo com o que foi descrito no item 4., o Estudo I foi concebido e realizado dentro do enfoque da linha de pesquisa “Processos erosivos em vertentes e calha fluvial”, existente no IPH.

A proposta deste trabalho foi de desenvolver um sistema capaz de permitir estudar a resposta da interação entre a vazão de alimentação e a declividade do canal experimental quando o escoamento superficial avança sobre um maciço de solo de origem agrícola. A partir da obtenção dos dados experimentais, a próxima etapa foi avaliar os parâmetros hidráulicos e sedimentométricos. Partindo da coleta, durante os ensaios, dos dados de níveis de água, das velocidades do fluxo e das concentrações de sedimento, apresenta-se, no que segue, uma análise dos parâmetros hidráulicos e sedimentométricos envolvidos na geração de sulcos de erosão em meio coesivo (solo argiloso).

5.1.- Comportamento dos parâmetros hidráulicos envolvidos na desagregação do maciço de solo, durante a passagem do escoamento superficial

Após a conclusão de todo o protocolo inicial de preparação para cada evento, iniciaram-se os ensaios e começaram as avaliações da velocidade do escoamento através do uso de um traçador, as leituras das alturas de lâmina do escoamento e da superfície do maciço de solo e a quantificação da concentração de sedimentos no escoamento, além da determinação da temperatura da água e do tempo de duração de cada evento.

5.1.1.- Temperatura da água e duração dos eventos

Nota-se uma oscilação na temperatura da água utilizada nos ensaios, a qual esteve intimamente relacionada com a época de realização de cada evento, ou seja, variou de 12°C a 25°C (Tabela 5.1.). A seqüência de vazões referentes a primeira declividade foi realizada no final do inverno, com uma temperatura média da água de 16,3°C e na segunda declividade de trabalho, os ensaios foram conduzidos na primavera e com isso a temperatura média da água subiu para 20°C. Por ocasião da realização dos ensaios com o canal nos 9,0%, a temperatura média da água girou em torno de 24,0°C pois, já estávamos no verão. O aumento da temperatura da água provocou redução na viscosidade cinemática, influenciando, por exemplo, no valor do Número de Reynolds que indicará se o fluxo é laminar ou turbulento.

Tabela 5.1.- Variação da temperatura da água, durante a realização dos ensaios, avaliada com o termômetro colocado Cuba-II.

Vazão (L.min ⁻¹)	Declividade (%)		
	3,0	6,0	9,0
	----- ° C -----		
10,0	21,0	25,0	23,0
18,5	19,0	21,0	23,0
25,5	12,0	18,0	25,0
38,5	13,5	17,0	24,0
51,0	16,0	19,0	25,0
Média	16,3	20,0	24,0
Desvio Padrão	3,34	2,83	0,89
Coef. de variação (%)	20,52	14,14	3,73

O tempo de duração previamente estabelecido para cada um dos quinze eventos foi de 60 minutos. Entretanto, em pelo menos quatro oportunidades essa condição foi desrespeitada e em três ocasiões o tempo foi superado em 15 e 30 minutos, com o objetivo de verificar se o processo de estabilização da superfície do maciço já estava completo e definido. Tal

comportamento pode ser confirmado através da mínima variação nos valores medidos de velocidade do escoamento após terem sido decorridos 60 minutos de duração dos eventos (Figura 5.1. e nas Tabelas A.1. até A.15., no Anexo A).

Além disso, em um dos eventos o tempo foi reduzido em 20 minutos. Neste caso, a vazão e a declividade eram máximas. Esta condição, fez com que a desagregação do maciço de solo e o transporte de partículas e de agregados de solo fossem muito elevados. Portanto, durante a passagem da vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal colocado na declividade de 9,0%, houve um sério risco de que o fundo do sulco que estava se formando, especialmente na primeira seção, pudesse tocar o filtro colocado junto ao fundo do canal e prejudicasse a realização do ensaio.

5.1.2.- Velocidade do escoamento superficial

A Figura 5.1. apresenta os valores da velocidade do escoamento superficial, avaliados através do método do traçador, ao longo do ensaio, para as diferentes declividades e vazões e na Tabela 5.2. estão apresentados os valores médios, os valores máximos e os valores mínimos da velocidade do escoamento superficial. Os dados originais que possibilitaram a confecção dos gráficos apresentados na Figura 5.1. estão disponíveis no Anexo A, nas Tabelas A.1. até A.15..

A média das velocidades do escoamento registradas em cada vazão e declividade ensaiadas variou entre $0,07$ e $0,41\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Tabela 5.2.), apresentando uma relação direta com a elevação da vazão de alimentação do canal. Observando-se a Figura 5.1. em conjunto com a Tabela 5.2., percebe-se que, para a declividade de 3,0%, uma pequena amplitude de variação das velocidades, pois elas se mantiveram oscilando em torno de um valor médio, sobretudo para as quatro primeiras vazões.

Nota-se que a clara dependência existente entre a velocidade e a vazão na declividade de 3,0%, à medida que aumenta a energia do escoamento, começa a ser alterada pela mudança na rugosidade do meio. Não raro, ocorrem velocidades iguais para vazões distintas, como por exemplo, o que pode ser observado aos 20 minutos de ensaio na declividade de 6,0% com as vazões de 25,5; 38,5 e $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ (Figura 5.1.). Tal fato sugere que as deformações sofridas pelo maciço de solo, alterando a rugosidade inicial do meio, e com isso a concentração de partículas sólidas no fluxo são fatores que influenciam no comportamento da velocidade do escoamento.

O comportamento da média das velocidades do escoamento, para as três declividades e para as cinco vazões crescentes aplicadas está apresentado na Figura 5.2.. Observa-se que a elevação da vazão fez com que a velocidade superficial do escoamento aumentasse.

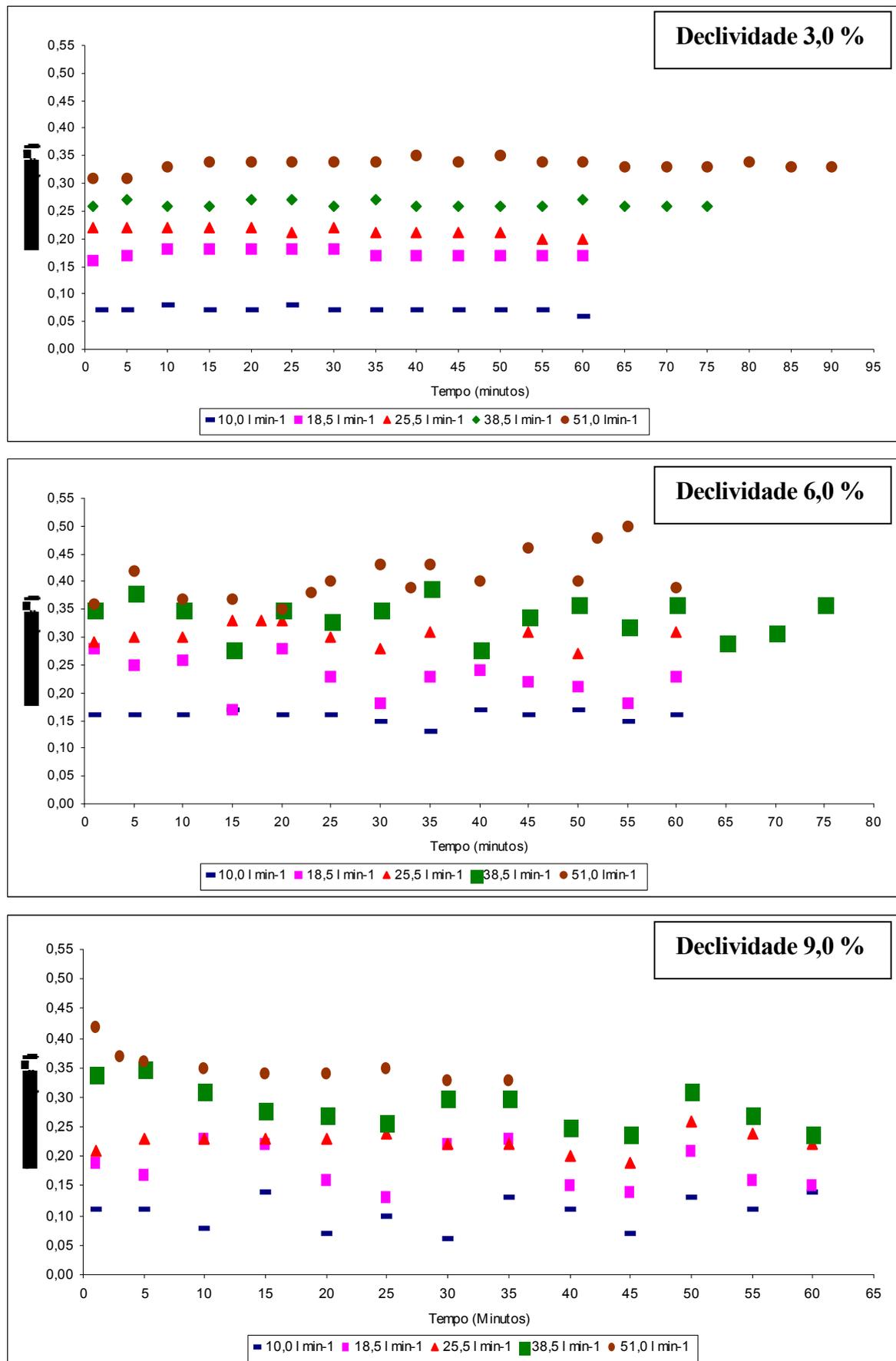


Figura 5.1.- Síntese do comportamento da velocidade do escoamento superficial, durante os eventos onde foram aplicadas das cinco vazões crescentes, em função do tempo de duração de cada um dos ensaios com o canal colocado nas declividades de trabalho.

Quando se avalia a influência da declividade sobre a velocidade média do escoamento superficial, percebe-se que não há uma correspondência direta entre o aumento da declividade e a velocidade do fluxo. Por exemplo, os valores obtidos para a velocidade superficial do escoamento, nas declividades de 3,0 e 9,0%, foram semelhantes, como demonstram os dados que estão apresentados na Tabela 5.2., enquanto que para a declividade de 6,0% eles foram maiores.

Tabela 5.2.- Variação da velocidade superficial do escoamento, durante a realização dos ensaios, avaliada através do uso de traçador.

Declividade (%)	Vazão (L.min ⁻¹)	Velocidade superficial do escoamento				
		Média (m.s ⁻¹)	Máxima (m.s ⁻¹)	Mínima (m.s ⁻¹)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
3,0	10,0	0,07	0,08	0,06	0,004	6,0
	18,5	0,17	0,18	0,16	0,006	3,6
	25,5	0,21	0,22	0,20	0,006	2,6
	38,5	0,26	0,27	0,26	0,003	1,2
	51,0	0,33	0,35	0,31	0,010	3,0
6,0	10,0	0,16	0,17	0,13	0,008	5,3
	18,5	0,23	0,28	0,17	0,035	15,1
	25,5	0,30	0,32	0,27	0,022	7,2
	38,5	0,34	0,39	0,28	0,033	9,8
	51,0	0,41	0,50	0,35	0,042	10,3
9,0	10,0	0,10	0,14	0,07	0,027	26,3
	18,5	0,18	0,23	0,13	0,035	19,3
	25,5	0,22	0,26	0,19	0,017	7,7
	38,5	0,29	0,35	0,24	0,034	12,0
	51,0	0,35	0,42	0,33	0,026	7,3

Entre os motivos que contribuíram para este tipo de comportamento está o fato, que na declividade de 9,0%, durante a passagem das duas primeiras vazões, ocorreu escoamento sub-superficial no maciço; portanto, reduzindo a velocidade do escoamento. O escoamento superficial avançava pela primeira seção e na metade da segunda seção (0,75m do ponto de entrada de água) infiltra no maciço, voltando a aflorar apenas no final da quinta seção, ou seja, ocorria um fluxo sub-superficial por uma distância de, aproximadamente, dois metros sobre o maciço. Também, no momento da aplicação das vazões mais altas, o escoamento já estava concentrado no(s) sulco(s) e sob regime turbulento. Nesta condição, o fluxo provocava tanto o revolvimento do fundo como a queda das paredes do sulco em formação, gerando, desta forma, um aumento da carga de sedimentos transportada pelo escoamento superficial.

Durante a passagem das altas vazões, já estava ocorrendo o processo de erosão regressiva e queda das paredes do(s) sulco(s), condição esta capaz de fazer com que o fundo

do sulco se tornasse mais rugoso e a seção se alargasse permitindo que a velocidade média do escoamento superficial sofresse redução (GOVERS, 1992; NEARING *et al.* 1997).

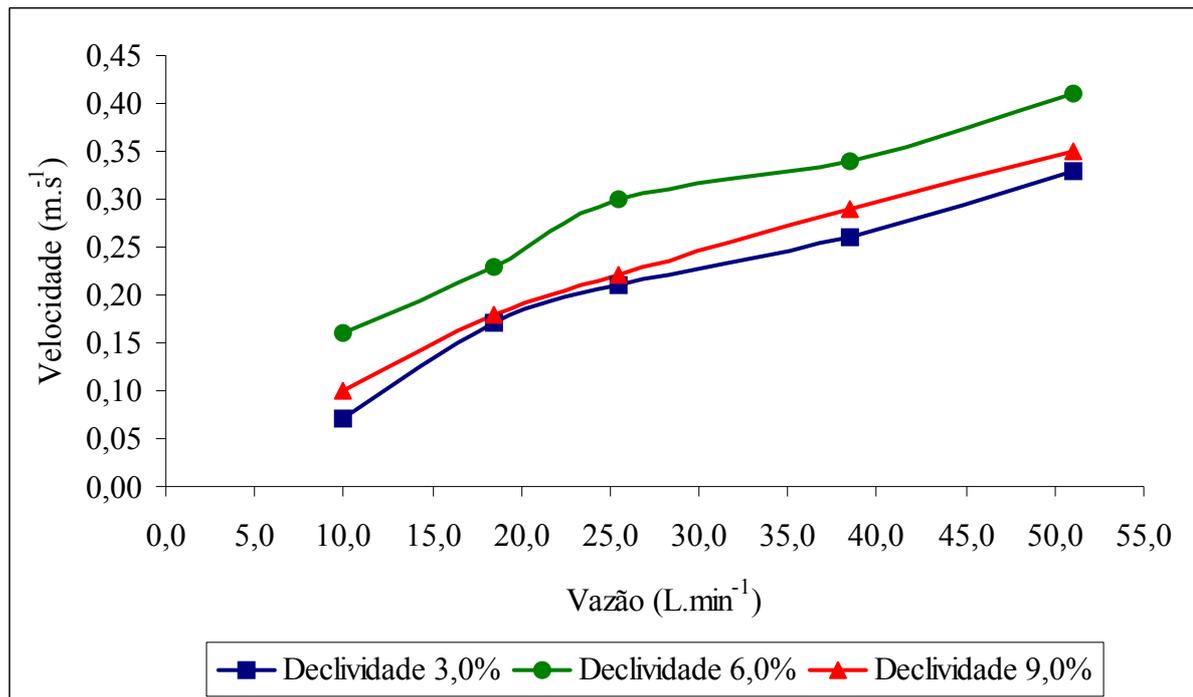


Figura 5.2.- Comportamento da média das velocidades do escoamento superficial, conforme aumenta a vazão de alimentação do canal de declividade variável.

5.1.3.- Altura de lâmina do escoamento

As Figuras 5.3., 5.4. e 5.5. apresentam os valores de altura de lâmina levantados, através da ponta linimétrica, em diferentes seções e momentos durante a realização dos ensaios. Os dados originais das Figuras 5.3., 5.4. e 5.5. estão no Anexo A, nas Tabelas de A.1. até A.15..

Deve-se registrar que, quando da passagem da vazão de 51,0L.min⁻¹, com o canal colocado na declividade de 9,0%, na zona de transição (Figura 4.2.) e logo no início do evento, a profundidade atingiu valores superiores a 0,033m. Tal fato ocorreu devido ao grande revolvimento do fundo junto da entrada de água no canal. Devido a isso, alguns dados de profundidade apresentados no Anexo A, estão considerados como sendo “falha”.

Nas duas máximas vazões na declividade de 3,0%, a maioria dos pontos observados estão colocados entre 0,010 e 0,025m. Nos 6,0%, os maiores valores de altura de lâmina foram verificados durante a passagem dos 51,0L.min⁻¹. Na declividade de 9,0%, foi na vazão de 38,5L.min⁻¹ que ocorreu a maior oscilação na altura de lâmina. Por ocasião da passagem da vazão de 10,0L.min⁻¹, a altura de lâmina foi muito baixa devido à presença do processo de infiltração de água no maciço de solo, como já foi comentado no item anterior.

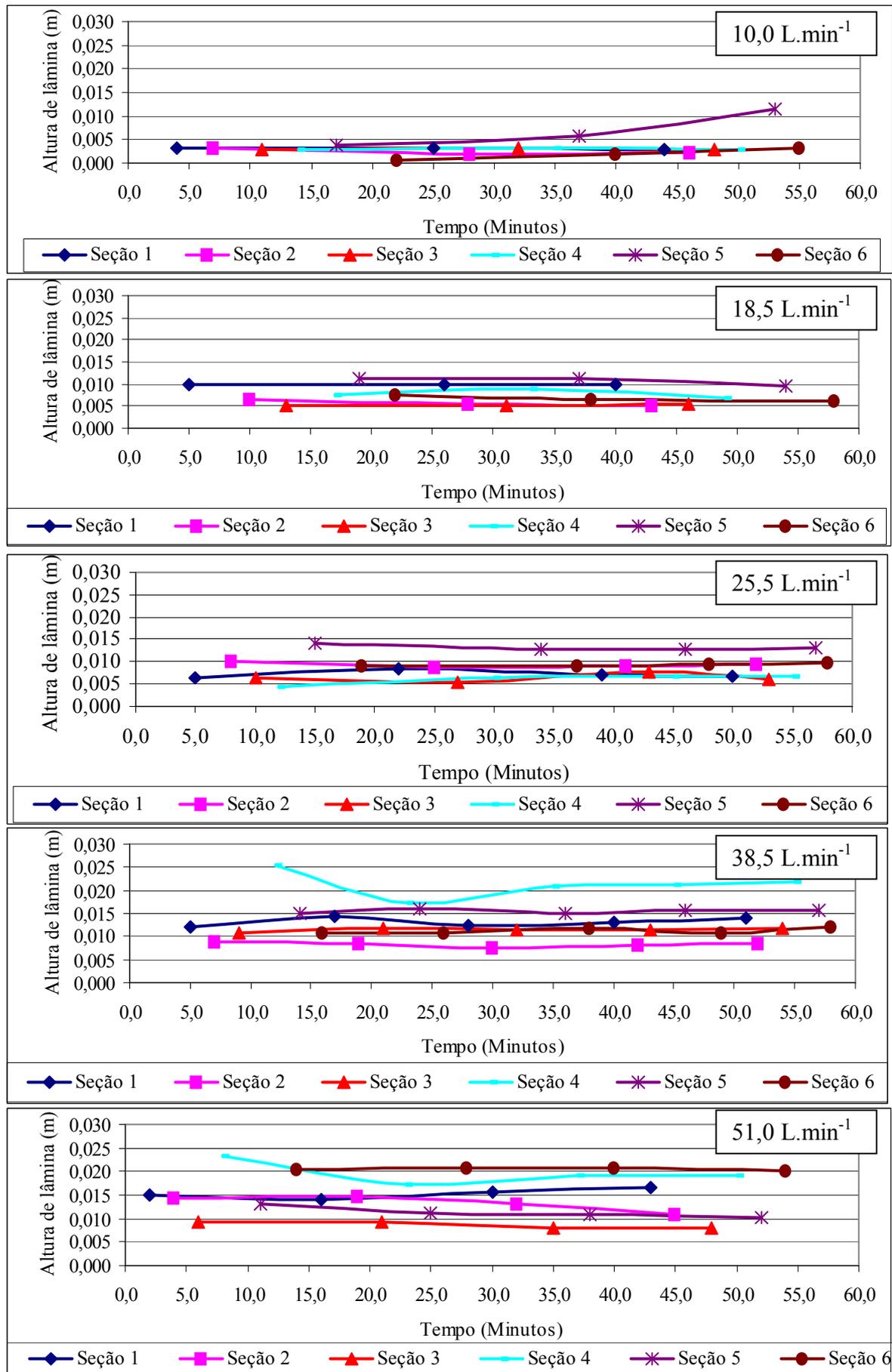


Figura 5.3.- Altura de lâmina do escoamento superficial em função do tempo de duração de cada ensaio, para as cinco vazões, com o canal na declividade de 3,0%.

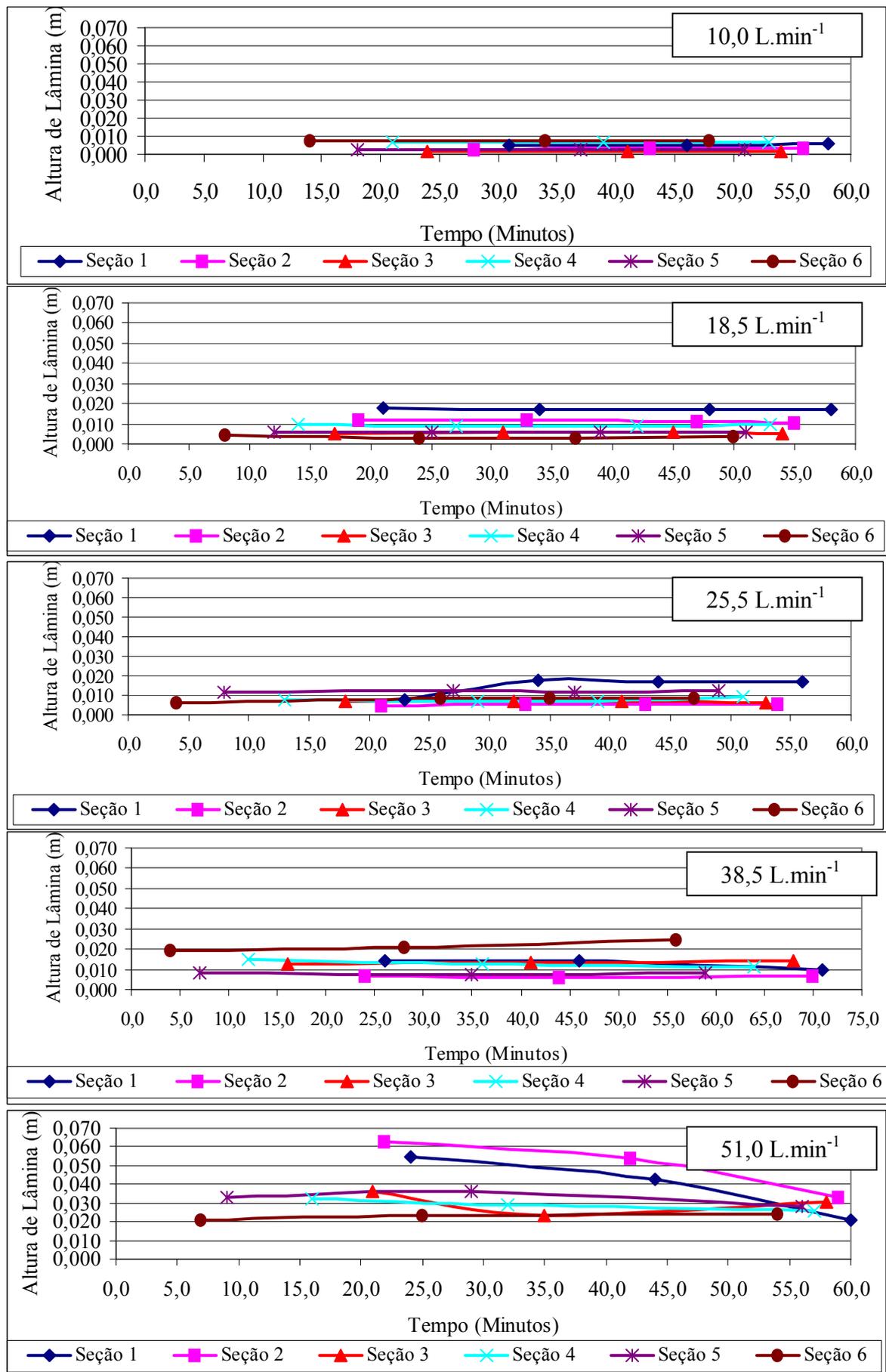


Figura 5..4.- Altura de lâmina do escoamento superficial em função do tempo de duração de cada ensaio, para as cinco vazões, com o canal na declividade de 6,0%.

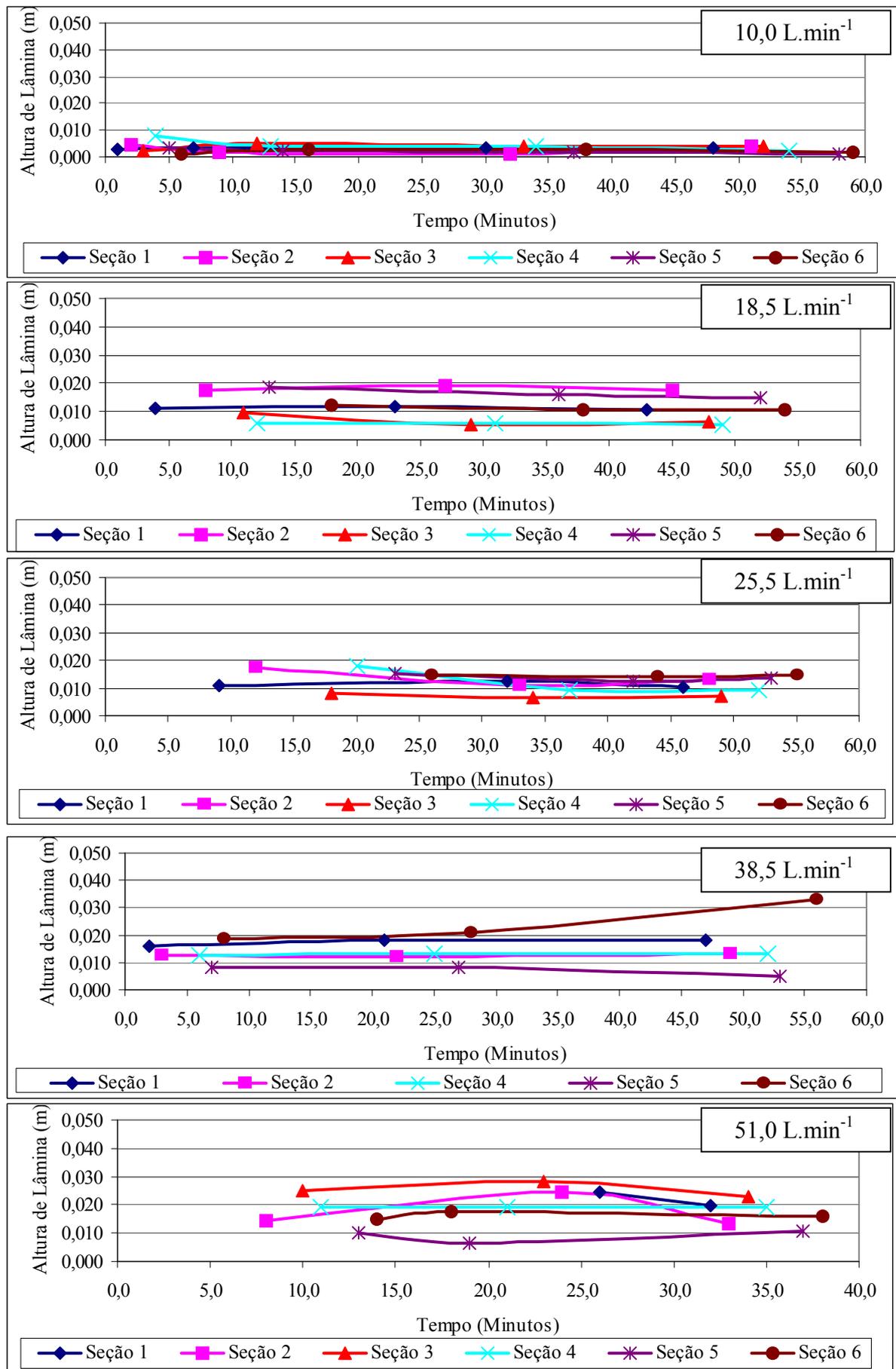


Figura 5.5.- Altura de lâmina do escoamento superficial em função do tempo de duração de cada ensaio, para as cinco vazões, com o canal na declividade de 9,0%.

Os picos de altura de lâmina ocorreram antes da metade dos ensaios, nas declividades de 3,0 e 6,0%, sendo aos 12 minutos e aos 22 minutos, respectivamente. Na declividade de 9,0%, o ponto de máxima altura de lâmina ocorreu, praticamente, no final do evento, ou seja, durante a passagem dos $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, aos 56,0 minutos. Portanto, exceto para a seção 6 dos $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ na declividade de 9,0%, é possível perceber que, após decorridos, aproximadamente, 40 a 45 minutos de duração dos ensaios, a altura de lâmina do escoamento superficial apresenta uma variação muito pequena

Observa-se que, transcorrido um determinado período do tempo de ensaio, aproximadamente, 45,0 minutos, a tendência da altura de lâmina do escoamento superficial é se estabilizar para todas as vazões e declividades adotadas.

O avanço dos sulcos de erosão, por ocasião da passagem das maiores vazões, fez com que houvesse elevação na altura de lâmina do escoamento, demonstrando que a redução na velocidade superficial do fluxo correspondeu a uma imediata elevação na altura de lâmina, especialmente, para a declividade de 6,0%, conforme fica demonstrado nas Figuras 5.3., 5.4. e 5.5.. É importante, reafirmar que tal tendência não foi tão evidente na curva representativa da declividade de 9,0%, quanto nos 6,0% porque o último ensaio da máxima declividade foi interrompido aos 40 minutos de duração e algumas das leituras foram descartadas.

Até aqui, foram discutidos tanto o comportamento da média das velocidades do escoamento superficial e as variações ocorridas na altura de lâmina do escoamento. Estes dois parâmetros são fundamentais para que se possa realizar a caracterização hidráulica do escoamento que provocou a deformação na superfície do maciço de solo, a ser discutida e apresentada logo a seguir.

5.1.4.- Deformações observadas no maciço de solo

As informações básicas para a discussão das características finais da superfície do solo após a passagem do escoamento foram obtidas nas superfícies construídas no programa computacional SURFER®, com base nas leituras realizadas com o sistema Laser de varredura, onde foi possível visualizar para cada declividade e vazão as alterações ocorridas no maciço e a passagem de escoamento difuso para fluxo concentrado.

É importante lembrar que, embora o maciço apresentasse uma largura de 0,74m, as superfícies construídas pelo programa computacional SURFER®, que são resultado das leituras realizadas com o sistema laser de varredura e por isso, apresentam uma largura de apenas 0,60m. Portanto, os sulcos que se desenvolveram junto das bordas do canal não são apresentados com a sua largura total, especialmente, para as declividades de 6,0 e 9,0%.

Na Figura 5.6., o primeiro quadro mostra a superfície do maciço logo após a aplicação da chuva simulada, de 60mm.h^{-1} , que ajudou a destruir os agregados maiores e desta forma, uniformizar a superfície do solo. As demais imagens são o produto final da passagem das cinco vazões ensaiadas na declividade de 3,0%. Na menor declividade, as alterações mais significativas na superfície do maciço começaram a ocorrer na $25,5\text{L.min}^{-1}$.

Neste evento, foi o momento em que as linhas de fluxo deixam de ser paralelas entre si (escoamento difuso) e começaram a aparecer os primeiros micro-canais e as fossas de erosão, mesmo que o escoamento só fosse apresentar energia suficiente para romper a estrutura do maciço de solo argiloso e provocar incisão de um sulco, durante a passagem da vazão seguinte.

Neste caso, os $38,5\text{L.min}^{-1}$, com uma velocidade de cisalhamento de $0,059\text{m.s}^{-1}$, aproximadamente, duas vezes superior ao valor limite proposto por Rauws (1987) e por Govers (1987), para solos de textura siltosa, em estudos realizados com o canal experimental colocado nas declividades de 3,0 e 4,5%. Na declividade de 3,0%, o processo de incisão de pelo menos um sulco de erosão somente ocorreu depois que a tensão de cisalhamento do fluxo alcançou o valor da ordem de 3,65Pa.

De acordo com o modelo apresentado por Moss *et al.* (1982) que procura descrever o processo de geração e, posterior, formação dos protocanais e dos canais, as fossas de erosão são geradas a partir do desenvolvimento de correntes secundárias. Portanto, essas fossas de erosão podem ser consideradas como sendo o ponto de partida, ou seja, o embrião para o início do processo de incisão.

A quinta imagem apresentada na Figura 5.6. mostra que foi nos $38,5\text{L.min}^{-1}$ que começaram a aparecer com maior nitidez o alinhamento dos pontos de menor cota, localizados na porção central do maciço e a, aproximadamente, 1,50m da entrada de água. A existência desses pontos e a sua localização indicam que o escoamento começa a se concentrar, possibilitando que o sulco passe da fase de incisão para a fase de sulco definido; uma vez que, com o canal na declividade de 3,0% não ocorreu a fase intermediária de aprofundamento.

Durante a passagem da vazão de $38,5\text{L.min}^{-1}$, o processo de incisão do sulco ocorreu antes mesmo da metade do evento. A sua forma final ficou definida já durante a passagem da quarta vazão. Já que, o sulco em desenvolvimento praticamente não sofreu nenhuma alteração em termos de profundidade, comprimento ou mesmo na sua forma retilínea durante a passagem da vazão máxima. O mesmo tipo de forma retilínea também foi descrito por Giasson (1992), durante a discussão sobre a evolução de sulcos de erosão pré-formados no campo pela ação de vazões crescentes.

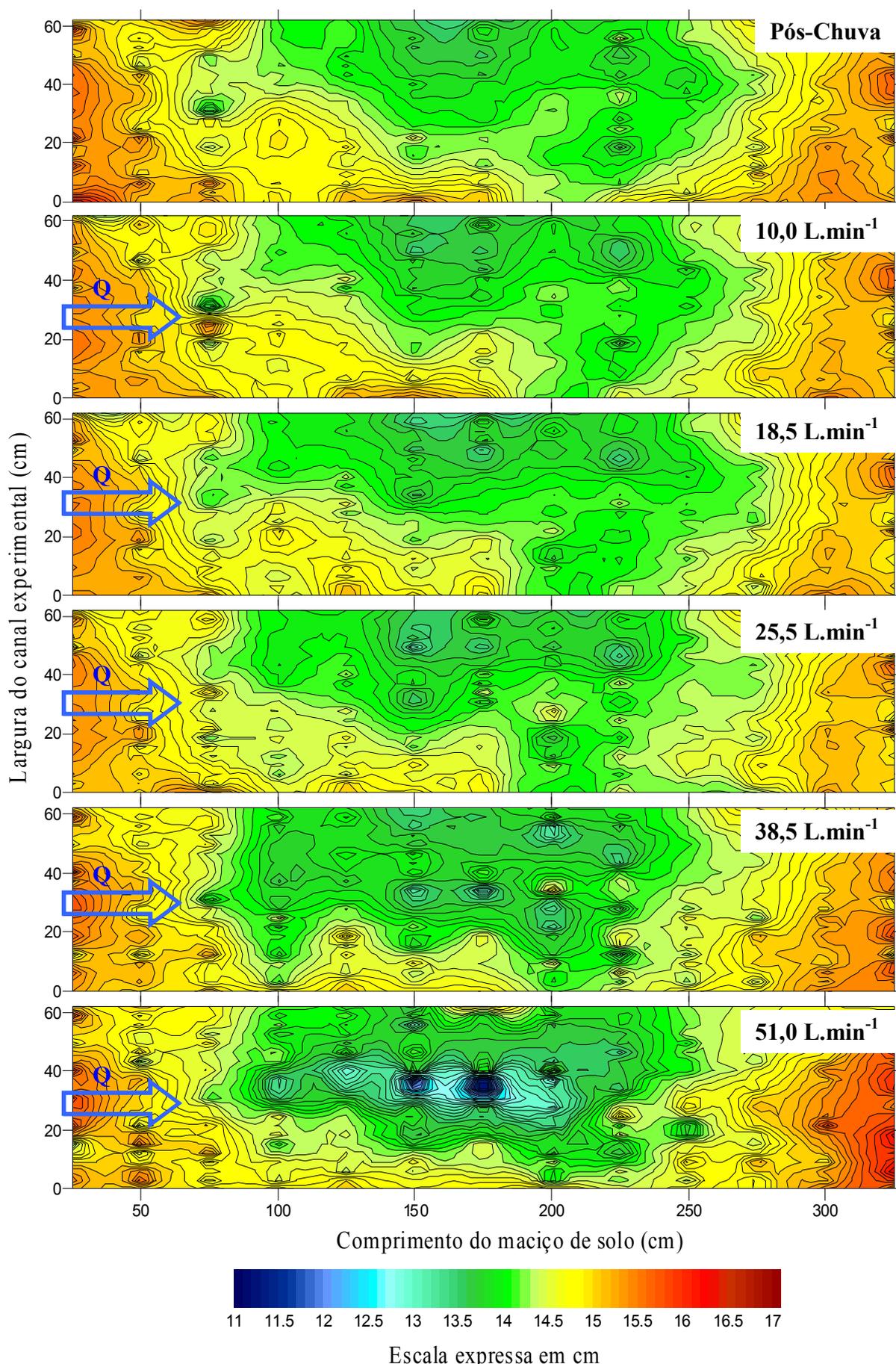


Figura 5.6.- Deformação provocada pela passagem das cinco vazões sobre o maciço, logo após a chuva simulada, com o canal na declividade de 3,0 %.

As características finais do sulco formado após a passagem das cinco vazões, com o canal colocado na declividade de 3,0%, podem ser visualizadas com maiores detalhes na última imagem da Figura 5.6. O sulco formado apresentou um comprimento de 0,75m, uma profundidade média de 0,03m e uma largura média de 0,07m.

Na Figura 5.7. nota-se, para a declividade de 6,0% e a vazão de 25,5L.min⁻¹, a presença dos primeiros pontos com cotas mais baixas posicionados junto à borda esquerda do canal a, aproximadamente, 1,20m do ponto de entrada de água e junto da borda direita do canal a 2,0m da entrada de água. A presença desses dois pontos indica que pelo, menos nestes locais, o processo de desagregação já se torna mais efetivo, ou seja, estão presente os micro-canais e o escoamento começa a se concentrar.

Com o canal na declividade de 6,0%, é por ocasião da passagem dos 51,0L.min⁻¹ que se verifica a presença mais intensa da erosão regressiva, fazendo com que o sulco passe da fase de aprofundamento para sulco definido, sendo que, logo a 1,0m da entrada de água a profundidade máxima é atingida, em torno de 11,0cm. Tal observação concorda com os estudos desenvolvidos por Bryan e Poesen (1989), nos qual afirmam que os processos de desagregação mais intensos começam em declividade superior a 3,0%.

O processo de erosão regressiva foi a forma pela qual o(s) sulco(s) de erosão evoluíram no sentido contrário ao declive, especialmente, durante a passagem das vazões de 38,5 e 51,0L.min⁻¹. Este mesmo tipo de comportamento foi observado por Foster *et al.* (1984.a) quando da formação do sulco de erosão no campo e por Braida (1994) em sulco pré-formado no campo submetido à ação de vazões crescentes.

Na última imagem, gerada através do programa computacional Surfer[®] e apresentada na Figura 5.7., se identifica a existência de um segundo sulco posicionado junto à borda esquerda do canal, o qual já havia iniciado durante a passagem da vazão de 25,5L.min⁻¹. Entretanto, o seu avanço só ocorreu até os primeiros 25 minutos de duração do ensaio. Uma vez que, o processo de erosão regressiva foi mais intenso no sulco localizado no lado esquerdo do maciço de solo. A presença de intensa erosão regressiva fez com que por volta da metade do ensaio o sulco localizado no lado esquerdo chegasse até a entrada de água do canal (Cuba-II).

Portanto, toda a água que entrava no canal passava para o sulco do lado esquerdo, deixando o sulco do lado direito sem água. O sulco que avançou sobre o maciço, após a passagem das cinco vazões crescentes, com o canal na declividade de 6,0% apresentou um comprimento de 1,40m, uma profundidade máxima de 0,11m e uma largura máxima, junto da entrada de água, de 0,25m.

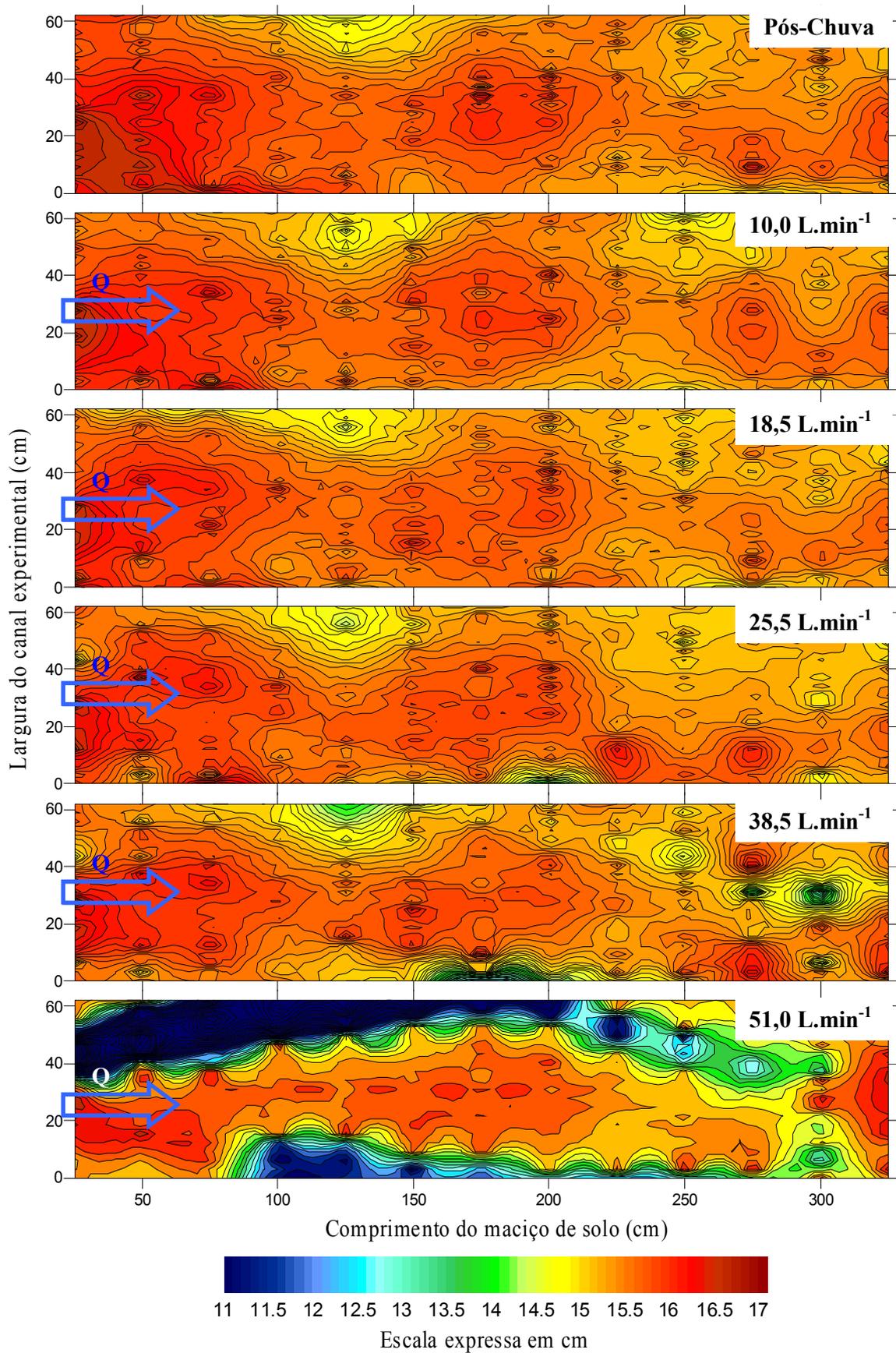


Figura 5.7.- Deformação provocada pela passagem das cinco vazões sobre o maciço, logo após a chuva simulada, com o canal na declividade de 6,0 %.

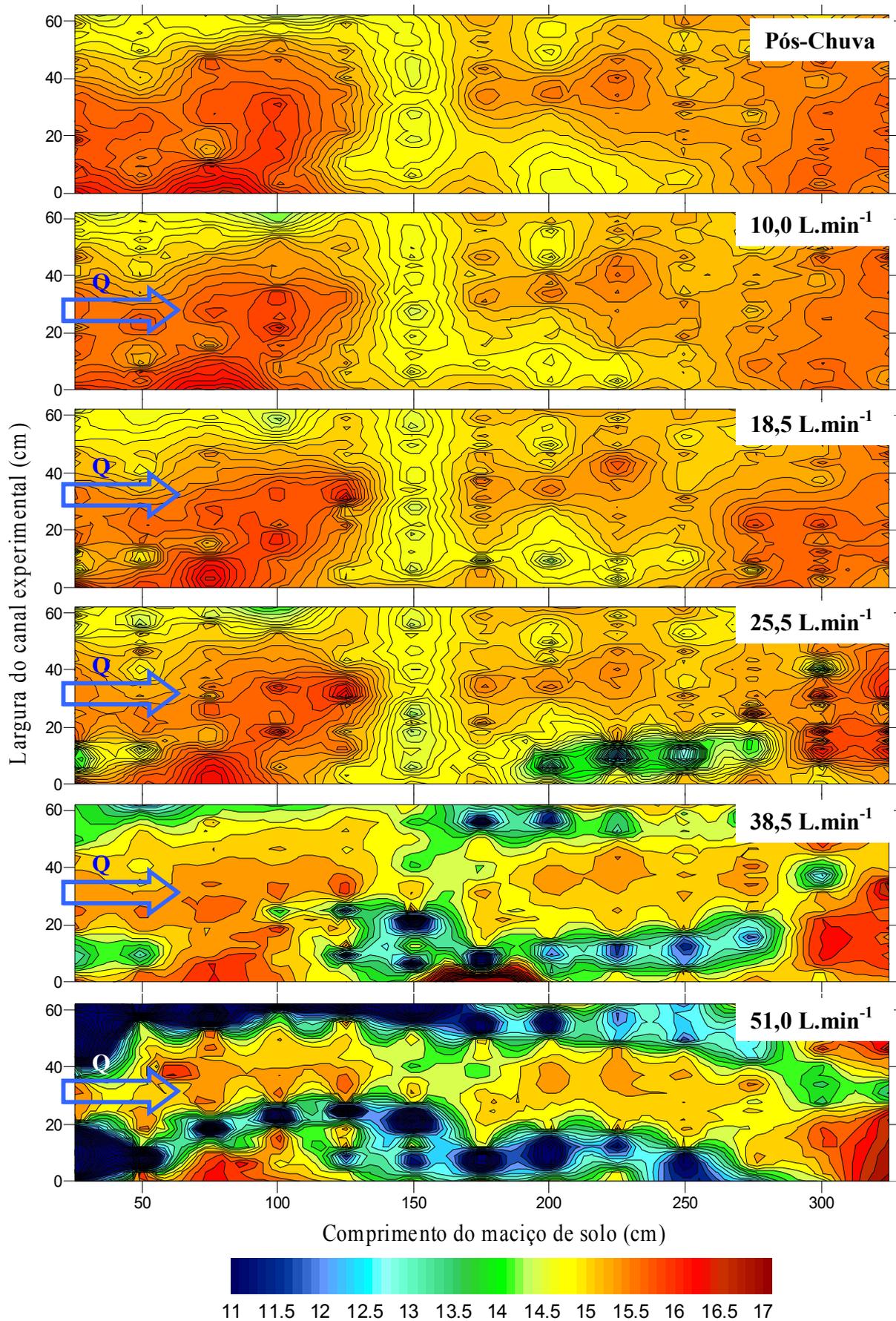


Figura 5.8.- Deformação provocada pela passagem das cinco vazões sobre o maciço, logo após a chuva simulada, com o canal na declividade de 9,0 %.

Pelas imagens geradas no programa computacional Surfer® e apresentadas na Figura 5.8., se percebe que, com o canal na declividade de 9,0%, o primeiro sulco a incidir (lado esquerdo do maciço), durante a passagem da vazão de 18,5L.min⁻¹, só se aprofundou quando da passagem dos 38,5L.min⁻¹. Já que, durante a passagem dos 25,5L.min⁻¹, a sua evolução foi pequena, ou seja, com profundidade inferior a 3,0cm e comprimento menor do que 1,0m.

Na declividade de 9,0%, a fase de sulco definido ocorreu durante a passagem das vazões de 38,5 e 51,0L.min⁻¹, os pontos de maior profundidade foram de 9,0cm e de 11,0cm, respectivamente (Figura 5.8). Essas profundidades são semelhantes àquelas que ocorreram com o canal na declividade de 6,0 %. Um questionamento pode ser apresentado, porque um incremento de 50,0% na declividade do canal não produziu um aumento na profundidade do sulco formado? A resposta para esta contradição está na forma como ocorreu a interação entre o escoamento e o contorno sólido, com o canal colocado na máxima declividade. É importante ressaltar que, na declividade de 9,0%, o ensaio foi terminado antes do tempo previsto e que se desenvolveram dois sulcos, como havia ocorrido nos 6,0 %. Entretanto, nos 9,0%, diferentemente, da declividade anterior os dois sulcos atingiram o ponto de entrada de água do canal. Portanto, a vazão de alimentação seguiu por dois caminhos diferentes, reduzindo a capacidade de desagregação e de transporte do fluxo, fazendo com que não ocorresse um sulco mais profundo na declividade de 9,0%.

Os dois sulcos que se desenvolveram sobre o maciço de solo, após a passagem das cinco vazões crescentes, com o canal colocado na declividade de 9,0% apresentaram um comprimento superior a 2,50m, uma profundidade de 12,0/13,0cm e uma largura junto do início da rampa de 20,0/25,0cm.

Como foi comentado anteriormente, a profundidade do sulco gerado após a passagem das cinco vazões com o canal em 3,0%, foi a mesma de quando passaram apenas três vazões com o canal em 9,0%. A diferença de energia do fluxo em cada situação se comprova pelo fato de que conforme aumenta a declividade, a vazão de incisão diminui, o ponto de incisão se aproxima da entrada de água (Tabela 5.3.) e a densidade do solo do maciço não se altera.

Tabela 5.3.- Vazão de incisão, período da incisão, seção e posição na superfície do maciço do ponto de incisão e densidade do solo do maciço, para as três declividades.

Declividade (%)	Vazão (L.min ⁻¹)	Período ¹ (Minuto)	Seção do Canal	Distância ² (m)	Densidade do Solo ³ (Mg.m ³)
3,0	38,5	25 – 30	S ₃	1,50	1,02
6,0	25,5	15 – 20	S ₂ – S ₃	1,20	1,05
9,0	18,5	25 – 30	S ₂	1,00	1,05

^{1.-} Intervalo de tempo em que ocorreu o processo de incisão; ^{2.-} Distância entre o início da rampa e o ponto de incisão; ^{3.-} Densidade do solo que formou maciço após a passagem das cinco vazões crescentes e sucessivas.

Uma grande parcela dos trabalhos, apresentados na literatura a partir dos anos 80, que buscam identificar e descrever como se desenvolve o processo erosivo usando os princípios e os pressupostos da hidráulica são oriundos de pesquisadores europeus. Em especial, do grupo de pesquisa existente na Bélgica, na Universidade Católica de Leuven (UCL), onde os professores Gerard Govers e Jean Poesen coordenam estudos que buscam conhecer o processo de geração de sulcos pela ação do escoamento e a sua relação com as características e a rugosidade do solo, além das alterações que podem ocorrer na geometria desses sulcos em formação.

Os resultados obtidos por Gimenez (2004), nos laboratórios da UCL, em experimento realizado com canal de declividade variável, contendo solo, nas declividades de 5,2; 8,5; 10,5 e 20,8%, demonstram que os sulcos incipientes começam a ser observados quando a vazão de alimentação era menor ou igual a $17,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. No presente estudo, as vazões incisão estão próximas daquelas obtidas por Gimenez (2004), ou seja, 25,5 e $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ para 6,0 e 9,0%.

5.1.5.- Posição da linha de água e do fundo ao longo do talveg do(s) sulco(s)

Os levantamentos da altura da linha de água foram realizados com o uso de ponta linimétrica, logo após a chuva simulada e, durante os ensaios, imediatamente após a passagem de cada vazão sobre a superfície do maciço. O levantamento das cotas referentes ao maciço de solo foram realizadas ao longo do talveg do sulco recém formado. As Figuras 5.9., 5.10. e 5.11. apresentam o desenvolvimento da linha de água e, por consequência, a variação das profundidades seguindo os pontos mais profundos do fundo do sulco (talveg).

a.- Declividade de 3,0%

Avaliando as curvas representativas do fundo do sulco e da linha de água (Figura 5.9.) e enfocando as vazões menores, se percebe que em vários pontos as duas curvas praticamente se tocam. Nos 10,0 e $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, com o canal nos 3,0%, o escoamento apresentou menor energia para vencer a resistência do maciço de solo argiloso dos quinze eventos realizados.

Portanto, não era de se esperar que a desagregação das partículas que pudesse ocorrer, em baixa declividade, fosse de grande magnitude a ponto de provocar alterações drásticas na superfície do solo. Esse comportamento pode ser comprovado pela manutenção das cotas do fundo muito próximas daquelas da profundidade original do maciço (0,20m), pelo menos até a passagem dos $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. Além disso, todos os eventos foram realizados com o canal em drenagem livre, parte do escoamento superficial infiltrou no maciço reduzindo o volume de água capaz de provocar alterações junto ao fundo do sulco.

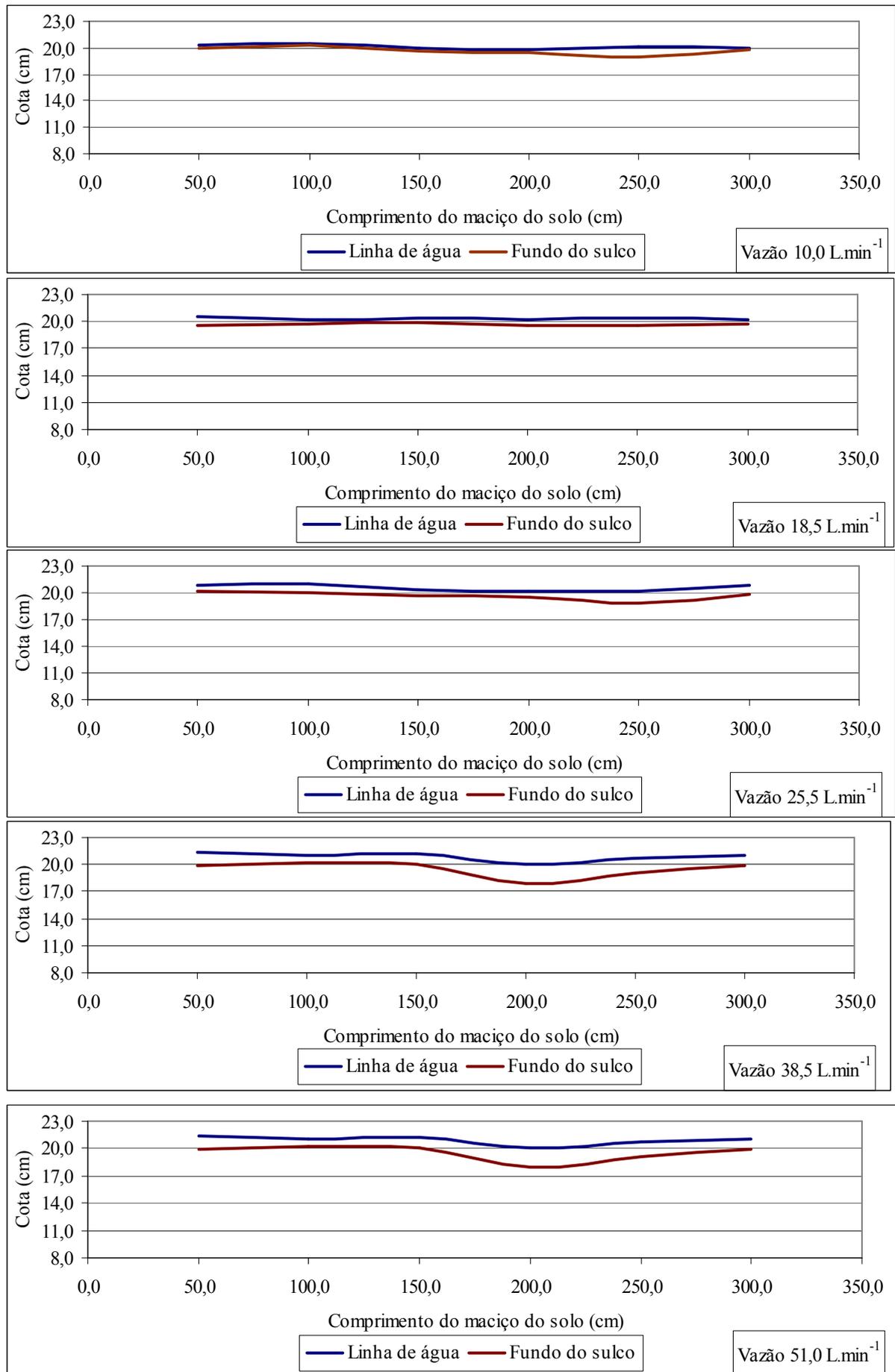


Figura 5.9.- Oscilações da linha de água e do fundo ao longo do talveg, para as cinco vazões ensaiadas, com o canal colocado na declividade de 3,0 %.

Entretanto, nesta condição de baixa declividade, mesmo que o processo desagregação seja pequeno, é possível perceber quando se compara o conjunto das cinco vazões crescentes, que existe uma constante oscilação entre os processos de desagregação/deposição. Este tipo de comportamento pode ser melhor compreendido quando da passagem da vazão de $10,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Na discussão realizada por Merten (2000) sobre a presença de “zonas de erosão” e “zonas de deposição” é referido que a presença de tais “zonas” não significa que nesses trechos do canal experimental tenha ocorrido somente um desses processos isoladamente. Na realidade, os dois processos ocorrem de forma simultânea ao longo da superfície do maciço de solo colocado no interior do canal. Entretanto, cada um deles com predominância e intensidade diferentes.

Nesta condição de baixa declividade associada com baixa vazão, o material que foi desagregado pelo escoamento permaneceu sobre a superfície do maciço de solo. Uma vez que, observando a Figura 5.9. e tendo como referência a divisão do canal em seções conforme mostrado na Figura 4.2., é possível perceber que existe a retirada de material na faixa de transição (0-50cm), depois uma leve elevação das cotas do fundo na faixa dos 50-150cm (escoamento difuso) e, logo em seguida, um novo revolvimento do fundo na parte central do maciço, ou seja, entre os 150-250cm (escoamento concentrado) e por fim, a partir deste ponto o processo de deposição recomeça, fazendo com que as cotas do fundo voltem a subir (250-300cm) e o escoamento superficial comece a se distribuir uniformemente sobre a superfície do maciço.

Outra evidência da permanência do material que foi desagregado e transportado sobre o maciço de solo é o fato de que houve uma pequena quantidade de material na cuba coletora situada na porção final do maciço de solo (Cuba-I), ponto de retenção de todo o material que foi mobilizado pela ação do escoamento superficial.

b.- Declividade de 6,0%

Nos dois gráficos iniciais, apresentados na Figura 5.10., é possível perceber que é mantido um determinado padrão em relação ao que foi visto nos gráficos que mostraram a superfície do maciço quando o canal estava colocado na declividade de 3,0%, ou seja, é possível perceber que o fundo do sulco e a linha de água estão muito próximos em alguns pontos, especialmente, quando da passagem da menor vazão, logo após a colocação do Latossolo no interior do canal experimental. Após a passagem dos $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, as alterações detectadas pelo leitor de rugosidade na superfície do solo foram muito pequenas, embora mais evidentes do que aquelas verificadas após a passagem dos $10,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$.

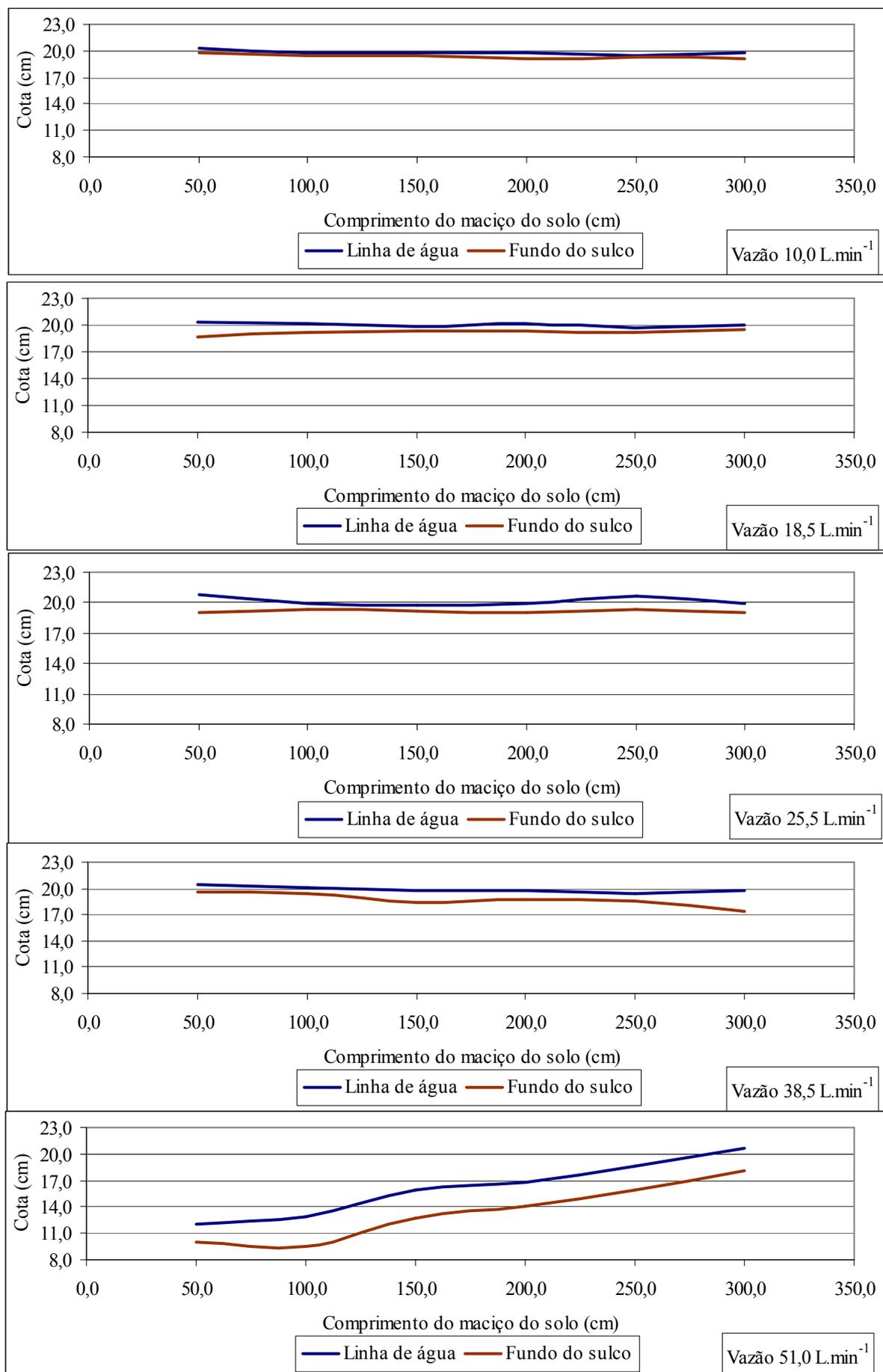


Figura 5.10.- Oscilações da linha de água e do fundo ao longo do talveg, para as cinco vazões ensaiadas, com o canal colocado na declividade de 6,0 %.

Para a declividade de 6,0%, a passagem da vazão de $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ foi o momento onde o processo de desagregação da superfície do maciço de solo se tornou mais efetivo. Uma vez que, a velocidade média do escoamento superficial subiu de 0,23 para $0,30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e as cotas do fundo do sulco se mantiveram constantes.

Quando da passagem da vazão de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, o distanciamento entre as linhas do fundo do sulco e da linha de água é maior, indicando que o incremento no processo erosivo prenuncia a presença da próxima etapa evolutiva dos sulcos, ou seja, o seu aprofundamento. O aprofundamento é melhor percebido naqueles pontos onde a profundidade máxima do sulco está em torno de 3,0cm (escoamento concentrado). Além disso, volta a estar presente a oscilação entre os processos de desagregação, de transporte e de deposição.

É possível perceber no último gráfico da Figura 5.10. que, grande parte do material que foi desagregado e transportado pelo fluxo concentrado no primeiro terço do maciço, se depositou logo em seguida, uma vez que as cotas do fundo do sulco subiram de 11,0cm para 20,0cm em pouco mais de 1,50m de distância, demonstrando, desta forma, que, novamente, grande parte do material desagregado e transportado se depositou sobre o maciço de solo.

c.- Declividade de 9,0%

As alterações no comportamento das linhas representativas do fundo e de água estão apresentadas na Figura 5.11.. No item anterior, quando foram apresentados os motivos que fizeram com que a velocidade do escoamento fosse muito baixa quando do escoamento das vazões de 10,0 e de $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ na declividade de 9,0%, foi referido que, em função da drenagem livre durante todos os ensaios realizados ocorreu a infiltração de água no maciço e, portanto, se estabeleceu um escoamento sub-superficial, o qual se prolongou desde os 0,30/0,50m (Seção 1) até os 2,0/2,20m (Seção 5) do comprimento total do maciço de solo (Figura 4.2.).

Este fato pode ser percebido através da observação da variação ocorrida nas linhas representativas tanto do fundo do sulco como da linha de água, apresentadas no primeiro gráfico que foi colocado na Figura 5.11.. As duas linhas se confundem, praticamente, por todo o comprimento do maciço de solo, indicando que praticamente inexistente escoamento sobre a superfície do solo.

Durante a passagem da vazão de $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, ocorreu um distanciamento um pouco maior entre as linhas representativas do fundo do sulco e a linha de água, uma vez que o escoamento sub-superficial foi observado apenas logo nos primeiros 15 e/ou 20 minutos de ensaio, começando próximo da entrada de água no canal e aflorando na metade do maciço. Logo em seguida, o maciço de solo ficou saturado e o escoamento superficial predominou.

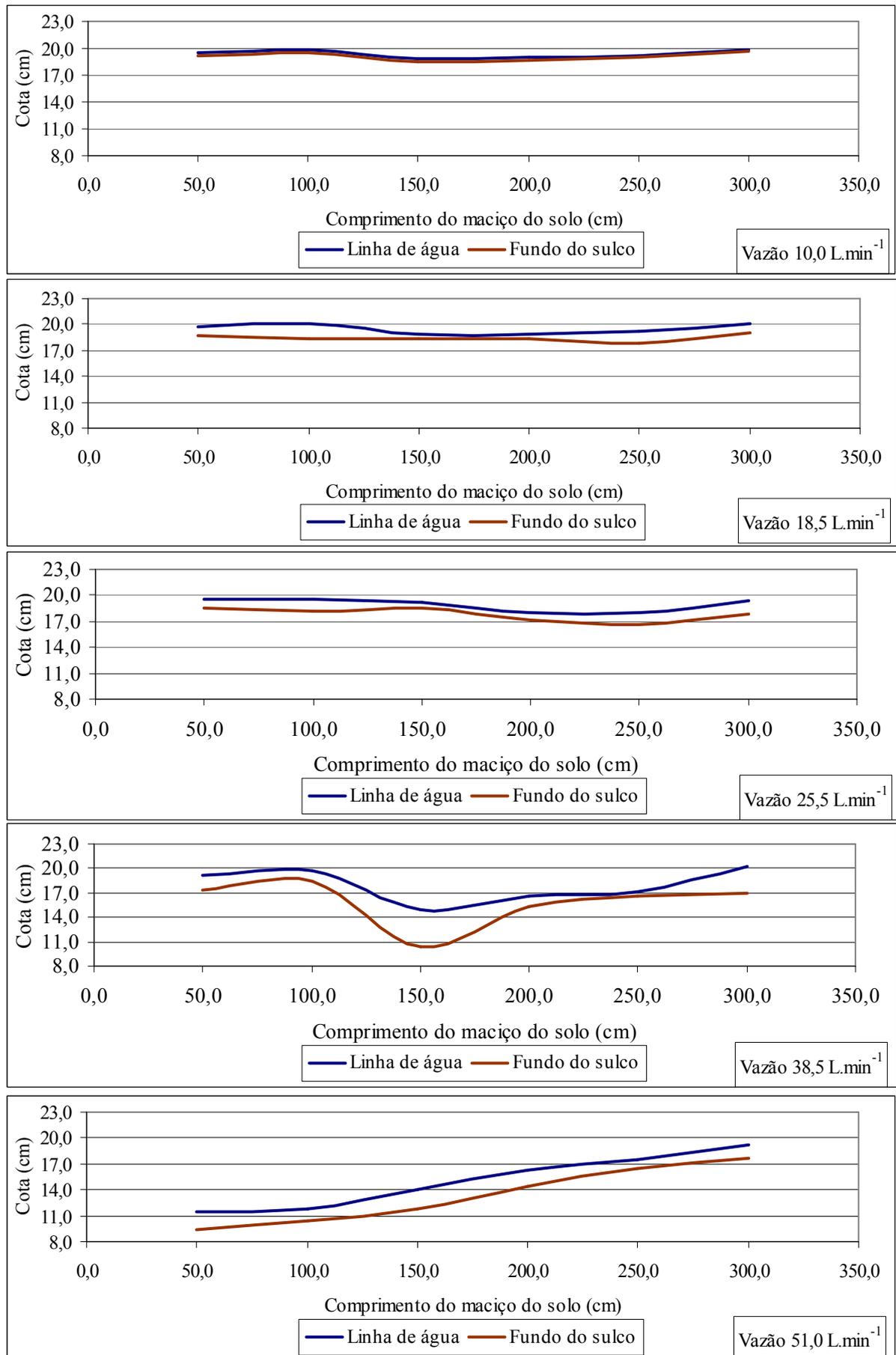


Figura 5.11.- Oscilações da linha de água e do fundo ao longo do talveg, para as cinco vazões ensaiadas, com o canal colocado na declividade de 9,0 %.

O fato haver escoamento superficial com uma velocidade média de $0,18\text{m.s}^{-1}$, a partir dos 20 minutos de ensaio, fez com que aumentasse a desagregação e com isso, ocorresse o desenvolvimento de pelo menos um sulco antes da metade do ensaio. Assim, o escoamento difuso tornou-se concentrado.

Foi durante a passagem da vazão de $25,5\text{L.min}^{-1}$, que o avanço efetivo do sulco ficou caracterizado, sendo que a percepção desse avanço se torna mais clara na parte final do maciço. Nesta região, o sulco em desenvolvimento atingiu uma profundidade aproximada de 3,0cm (Figura 5.11.). Entretanto, o sulco em formação não estava localizado exatamente no mesmo ponto onde ocorreu o primeiro foco de desagregação e sim estava posicionado junto à borda esquerda do canal a, aproximadamente, 2,0m da entrada de água (Figura 5.8.).

A profundidade de 3,0cm para o sulco de erosão gerado após a passagem das três primeiras vazões com o canal na declividade de 9,0% é a mesma do sulco formado após a passagem das cinco vazões crescentes sobre o maciço com o canal na declividade de 3,0%. Esta evidência sugere que para declividades mais elevadas, em estudos sob a condição de drenagem livre, a menor vazão de alimentação deva estar girando em torno dos $20,0\text{L.min}^{-1}$ para que possa haver a geração de pelo menos um sulco de erosão em meio coesivo argiloso, conforme sugerem os resultados obtidos por Gimenez (2004).

5.1.6.- Características hidráulicas do escoamento

Na Tabela 5.4. estão apresentados, para cada uma das declividades de trabalho e vazões de alimentação do canal, alguns dos parâmetros hidráulicos que caracterizam o escoamento superficial. Os valores médios de velocidade, altura de lâmina, raio hidráulico e perímetro molhado que possibilitaram o cálculo desses parâmetros hidráulicos foram obtidos nos instantes finais de cada um dos quinze eventos realizados, a partir da conformação final da seção transversal de cada seção de avaliação (Anexo B). As seções transversais (Anexo C), levantadas após a estabilização dos escoamentos, serviram de base para a determinação dos parâmetros geométricos dos sulcos (área, perímetro, raio hidráulico, etc). Portanto, já havia se estabelecido um equilíbrio entre as vazões de alimentação e as deformações do maciço.

Nos três parâmetros que estão sendo apresentados na Tabela 5.4., a tendência geral foi de crescimento conforme ocorreu o aumento tanto da vazão como da declividade do canal. A amplitude de variação para a tensão de cisalhamento (τ), exceto para as três primeiras vazões dos 3,0% (antes da incisão), ficou dentro da faixa de 1,0 a 30Pa proposta, por Foster e Meyer (1975), para solos agrícolas americanos. Os maiores valores, para os três parâmetros

característicos do escoamento avaliados, foram obtidos durante ou após o efetivo desenvolvimento de pelo menos um sulco de erosão sobre maciço de solo.

É importante verificar se os dados apresentados na Tabela 5.4. são semelhantes aos resultados de outros estudos realizados em solos brasileiros. Entretanto, não é comum encontrar estudos, seja em campo ou em laboratório, que relacionem parâmetros hidráulicos com a mecânica da erosão para solos de textura argilosa; os trabalhos de referência foram realizados, predominantemente, em solos de textura arenosa.

Tabela 5.4.- Parâmetros característicos do escoamento superficial detalhados para cada uma das declividades do canal e para cada uma das vazões crescentes e sucessivas aplicadas sobre o maciço de solo, indicando a vazão de incisão.

Declividade (%)	Vazão (L.min ⁻¹)	Tensão de cisalhamento (Pa)	Velocidade de cisalhamento (m.s ⁻¹)	Potência do escoamento (N.s.m ⁻¹)
3,0	10,0	0,38	0,019	0,06
	18,5	0,64	0,025	0,11
	25,5	0,50	0,022	0,14
	38,5	3,50	0,059	0,22
	51,0	4,09	0,064	0,31
6,0	10,0	4,60	0,068	0,12
	18,5	5,22	0,072	0,20
	25,5	7,28	0,085	0,28
	38,5	5,73	0,076	0,42
	51,0	11,80	0,109	0,43
9,0	10,0	4,97	0,071	0,15
	18,5	9,18	0,096	0,24
	25,5	11,59	0,108	0,39
	38,5	10,37	0,102	0,54
	51,0	14,89	0,122	0,50

Em trabalho realizado em parcelas experimentais instaladas a campo, na Estação Agronômica da UFRGS em Eldorado do Sul, por Cantalice (2002), foram aplicados fluxos extras de 10,0 a 50,0L.min⁻¹, diretamente em sulcos pré-formados em solo arenoso em uma área com 7,0% de declividade. Os resultados obtidos para a tensão de cisalhamento e para a velocidade de cisalhamento do escoamento, concentrado nos sulcos, oscilaram entre 6,5 e 15,6Pa e os valores da velocidade de cisalhamento variaram entre 0,081 e 0,125m.s⁻¹ e a potência do escoamento ficou entre 0,32 e 0,91N.s⁻¹, apresentando a mesma ordem de grandeza dos valores obtidos no presente estudo.

Na área experimental do Departamento de Solos da UFSM, foi desenvolvido um estudo para avaliar os efeitos do preparo do solo e da consolidação sobre a erosão em sulcos durante chuva simulada. O trabalho foi conduzido por Schäfer (1999), em solo arenoso com

8,5% de declividade. Os tipos de preparo de solo avaliados foram Plantio Direto (sem revolvimento) e o Preparo Convencional (com revolvimento). Os sulcos foram gerados durante a aplicação de uma chuva simulada de $65,0\text{mm.h}^{-1}$, durante 30 a 50 minutos, nos quais foram aplicados fluxos extras de $12,0$ a $60,0\text{L.min}^{-1}$. O valor mínimo da tensão de cisalhamento, nos sulcos, foi de $4,0\text{Pa}$ e o máximo foi de $8,0\text{Pa}$, para o preparo convencional recente e um valor de, aproximadamente, $15,0\text{Pa}$ para o sistema plantio direto.

Desta forma, com base nestes dois trabalhos, fica demonstrado que os resultados encontrados tanto para a tensão como para a velocidade de cisalhamento, neste experimento conduzido em laboratório, apresentam uma variação semelhante àqueles obtidos no campo, embora a composição textural dos solos estudados seja diferente daquela do Latossolo Vermelho distrófico típico que constituiu o maciço moldado no interior do canal.

5.1.7.- Regimes de escoamento

Avaliando os dados apresentados na Figura 5.12., onde estão colocados dados relativos aos instantes finais de cada um dos eventos, se percebe que para as condições estudadas, a maior parte dos valores encontrados, tanto para o Número de Reynolds como para o Número de Froude, estão na faixa correspondente a um regime de escoamento de transição, com o Número de Reynolds oscilando entre 500 e 2500 (CHOW, 1959) e em regime de fluxo sub-crítico, com Número de Froude inferior ou muito próximos da unidade, em uma condição de sulco em desenvolvimento.

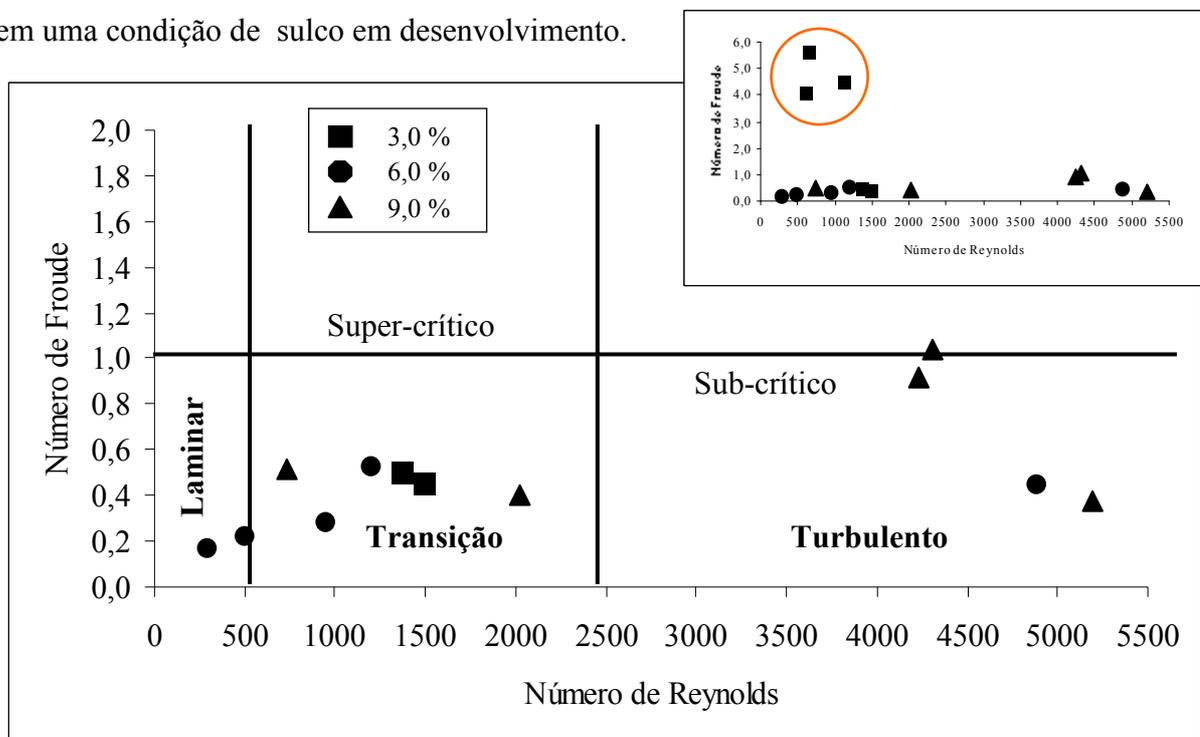


Figura 5.12.- Regimes de escoamento na condição de fluxo estabilizado, para as diferentes vazões e declividades estudadas.

Na Figura 5.12., no gráfico menor é apresentado o conjunto total dos pontos obtidos e no gráfico maior estão colocados apenas aqueles pontos em que o número de Froude foi menor ou muito próximo da unidade. O regime de fluxo laminar ocorreu apenas nas duas menores vazões com o canal na declividade de 6,0%. O fluxo turbulento ocorreu nas duas maiores declividades quando o sulco já estando desenvolvido na superfície do solo e o escoamento superficial canalizado.

Os valores claramente enquadrados no regime super-crítico (círculo do gráfico menor) ocorreram apenas quando o canal estava colocado na menor declividade onde se observou escoamento superficial difuso, com larguras efetivas da ordem da largura do maciço de solo e, portanto, com profundidades mais baixas. Nas outras observações realizadas, os valores do Número de Froude ficaram abaixo da unidade com apenas dois deles muito próximos do valor crítico de referência, ou seja, 0,92 ($38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) e 1,04 ($18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) com o canal na declividade de 9,0%.

Portanto, para as condições simuladas neste estudo, tanto a declividade do canal como os valores encontrados para o número de Froude foram inferiores àqueles propostos por Selby (1994) para a detecção da presença de sulcos, ou seja, Froude de 2,8 (sem chuva) e 5,0% de declividade. Através das fotografias, das superfícies geradas no programa computacional SURFER® e das observações qualitativas realizadas após a passagem dos $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, foi possível detectar, para a declividade de 3,0%, o desenvolvimento de pelo menos um sulco na superfície do maciço de solo com número de Froude de 0,50, ou seja, menor do que o valor indicado por Selby (1994).

A observação dos ensaios associada à determinação das condições hidráulicas presentes na superfície do maciço de solo, proporcionadas pelo aumento na declividade do canal e que favoreceram a elevação do número de Reynolds, contribuíram para o aumento da capacidade de desagregação (colapso das paredes do sulco), de transporte das partículas sólidas (aumento da capacidade de transporte do fluxo no sulcos) e de deposição do material em transporte no fluxo, como também foi relatado por MORGAN, 1996; BRYAN e POESEN, 1989.

5.1.8.- Resistência a passagem do escoamento

A resistência que o contorno sólido exerce à passagem das vazões foi avaliada através do cálculo dos coeficientes de rugosidade de Manning (n) e de Darcy Weisbach (f), apresentados na Tabela 5.5.. Enquanto que o primeiro representa, de forma global o efeito da rugosidade do material causado pelo seu tamanho (superfície/grão) e de sua conformação na seção (forma/disposição), o segundo foi estabelecido para representar apenas os efeitos das

“asperezas”. Assim, em um meio deformável, com intensa alteração de rugosidades e sujeito à processos de erosão regressiva, solapamento e deposições, os efeitos da perda de energia localizada são mais importantes do que aqueles causados pela natureza do material que constitui as paredes do sulco de erosão em desenvolvimento, fazendo com que a concepção do fator perda de carga de Darcy-Weisbach não seja adequada para a descrição do processo em estudo.

Tabela 5.5.- Variação na altura de lâmina (h), medida durante os ensaios, no número de Reynolds, no fator perda de carga de Darcy-Weissbach e no coeficiente de rugosidade de Manning para as condições estudadas, indicando a vazão de incisão.

Declividade (%)	Vazão (L.min ⁻¹)	Número de Reynolds	h medido (m)	Fator perda de carga (f)	Coeficiente de Manning (n)
3,0	10,0	648	0,0011	0,15	0,009
	18,5	1100	0,0019	0,05	0,008
	25,5	600	0,0015	0,04	0,008
	38,5	1365	0,0102	0,65	0,040
	51,0	1487	0,0111	1,22	0,052
6,0	10,0	298	0,0065	20,64	0,216
	18,5	499	0,0081	13,17	0,175
	25,5	951	0,0111	7,81	0,141
	38,5	1208	0,0086	2,30	0,076
	51,0	4887	0,0236	1,81	0,073
9,0	10,0	734	0,0057	7,24	0,107
	18,5	4307	0,0116	46,09	0,334
	25,5	2019	0,0128	10,66	0,146
	38,5	4234	0,0122	2,70	0,069
	51,0	5197	0,0251	2,39	0,089

O fator f e o coeficiente de rugosidade de Manning foram calculados utilizando a declividade da linha de energia (Ie), cuja metodologia de cálculo da declividade da linha de energia está apresentada no Anexo B.

A simples observação da variação dos valores do fator f (Tabela 5.5.) calculados para os ensaios, nos conduz a ordens de grandeza bem superiores àqueles de definição deste fator, por exemplo, no trabalho publicado por Nearing *et al.* (1997) onde foi calculado o fator f para solos dos Estados Unidos, com predominância de silte, a variação nos dados encontrados ficou entre 0,01 até 4,0 e, de acordo com Gerits *et al.* (1990), a variação no fator é de 0,01 até 1,0. Já a comparação dos valores do coeficiente de rugosidade de Manning com os valores tabelados nos conduz à faixas comuns em canais naturais escavados em terra (CHOW, 1959).

Na condição de sulco já desenvolvido (38,5 e 51,0L.min⁻¹), com o fluxo já canalizado e em eventos onde o escoamento apresenta uma maior capacidade desagregadora, exceto para os 3,0%, tanto o fator *f* como o coeficiente de rugosidade de Manning apresentam os menores valores. Esse tipo de comportamento se deve ao fato de que nas menores vazões, devido ao fato do escoamento ocupar uma largura maior (ainda não há estabilização do fluxo), a altura de lâmina do escoamento é baixa. Desta forma, qualquer tipo de obstáculo (elemento de rugosidade) ou mesmo a própria rugosidade existente na superfície do maciço de solo, torna-se uma barreira física a ser contornada pelo escoamento, fazendo com que o coeficiente de perda de carga seja maior (ABRAHAMS e PARSONS, 1991; GILLEY e FINKNER, 1991; NEARING *et al.*, 1997). Em outras palavras, pode-se afirmar que à medida que a rugosidade relativa (relação entre o tamanho das rugosidades da superfície e a altura de lâmina de água) diminui, há uma tendência de diminuição do coeficiente de rugosidade de Manning. Independentemente da declividade, à medida que aumenta a vazão, o coeficiente de rugosidade de Manning tende a um valor de mesma ordem de grandeza.

Os menores valores para o coeficiente de rugosidade de Manning foram detectados com a declividade de 3,0% quando da passagem das menores vazões, momento em que o escoamento superficial era difuso, com valores médios em torno de 0,008 antes da incisão (primeiras três vazões).

O comportamento dos dados relativos ao coeficiente de rugosidade de Manning encontrados no estudo de laboratório, conduzido por Foster *et al.* (1984.a), onde foi avaliada a velocidade do escoamento superficial em um sulco de erosão gerado no campo e posteriormente moldado em fibra de vidro (fundo fixo), colocado nas declividades de 3,0; 6,0 e 9,0%, apresentaram um comportamento diferentes daqueles obtidos no presente experimento.

No trabalho de Foster *et al.* (1984.a), no caso das declividades mais elevadas, os resultados obtidos no experimento realizado com a réplica de um sulco real não apresentaram uma tendência claramente definida, conforme a vazão de alimentação aumenta. Entretanto para a menor declividade (3,0%), os valores relativos ao coeficiente de Manning tenderam a diminuir com a elevação da vazão. Neste estudo, em uma condição de fundo móvel, para a menor declividade os valores obtidos apresentaram uma tendência de elevação. Também, os menores valores do coeficiente de Manning estão associados às maiores vazões, especialmente, após a presença do(s) sulco(s). Na declividade de 9,0% o coeficiente de rugosidade de Manning diminuiu com a elevação da vazão de alimentação do canal, exceto para as vazões mínimas e máximas (Tabela 5.5.), eventos em que ocorreu escoamento sub-superficial e interrupção do ensaio, respectivamente.

5.1.9.- Interação entre a perda de carga e o número de Reynolds

Quando são plotados em um mesmo gráfico os dados referentes ao Número de Reynolds e ao fator de perda de carga de Darcy-Weissbach, ocorre uma nítida separação entre os regimes de escoamento do fluxo, ou seja, laminar e turbulento conforme pode ser observado na Figura 5.13.. Com relação ao grupo de dados que se enquadram na faixa de regime laminar e transição é possível perceber uma tendência de redução no fator de perda de carga de Darcy-Weissbach conforme aumenta o Número de Reynolds, comportamento semelhante àquele que foi descrito por Nearing *et al.* (1997) e que pode ser observado diretamente no Diagrama de Moody (CHOW, 1959).

Os valores encontrados, neste estudo, para o número de Reynolds superam em até 10 vezes aqueles obtidos por Nearing *et al.* (1997) para os solos americanos. Os trabalhos de pesquisa conduzidos pelo grupo no qual estão inseridos Nearing *et al.* (1997) envolvem seis séries de experimentos em laboratório (usando como substrato areia de granulometria uniforme) e no campo envolvendo dois solos agrícolas dos Estados Unidos, um desses solos com textura arenosa e outro siltoso, testando três diferentes metodologias experimentais.

Nas condições de regime turbulento, neste estudo realizado no IPH-LaPED tendo como substrato solo de origem agrícola, foram encontrados dados que permitem fazer a comparação com aqueles obtidos pelos pesquisadores do NSERL-USDA nos Estados Unidos. Nas vazões de 38,5 e 51,0L.min⁻¹, nas declividades de 6,0 e 9,0%, o valor médio encontrado para o fator f está torno de 4,39. Indicando desta forma que, é possível inferir que os valores do fator de perda de carga de Darcy-Weissbach (f), para a condição de fluxo turbulento, não sofrem muita alteração conforme sugerem os resultados descritos por Nearing *et al.* (1997).

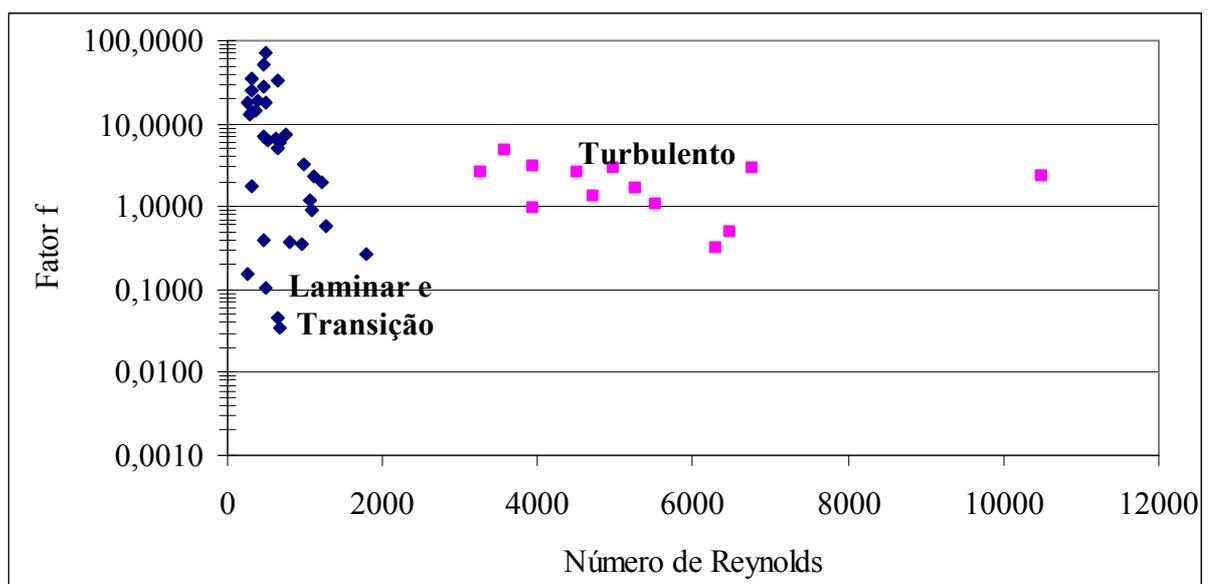


Figura 5.13.- Separação dos regimes de escoamento em função da relação entre o fator perda de carga e o número de Reynolds do escoamento superficial.

Em trabalho conduzido por Merten (2000) no IPH, onde o regime de escoamento foi supercrítico turbulento foi encontrada uma tendência muito semelhante. Os valores do fator de perda de carga se mantiveram oscilando em torno de um valor médio, mesmo que o número de Reynolds sofresse elevação. O estudo foi realizado no IPH-UFRGS, procurando avaliar as alterações que ocorrem nas características hidráulicas do escoamento quando é adicionado sedimento ao fluxo que escoava em canal, o contorno sólido utilizado foi um Latossolo Vermelho alumínio férrico típico (areia $80,0\text{g.kg}^{-1}$, silte 240g.kg^{-1} e argila $680,0\text{g.kg}^{-1}$).

5.2.- Comportamento dos parâmetros hidrossedimentológicos durante a passagem do escoamento superficial

As partículas e os agregados, que foram destacados da superfície do maciço pela ação do escoamento, poderiam tanto ficar retidos na Cuba-I como passar por ela e seguir na direção ao reservatório. O material que foi transportado para fora do canal foi coletado em potes, para depois ser quantificada a concentração de sedimentos no fluxo naquele instante (Anexo D).

A análise dos parâmetros hidrossedimentológicos será realizada com base tanto no material coletado nos potes, em geral, o material com menor diâmetro transportado via suspensão, quanto a partir do material que ficou retido na Cuba-I, em geral com predominância de maior diâmetro e, na sua maioria, transportado por arraste.

As curvas granulométricas e, por conseqüência, os diâmetros característicos do material transportado foram determinados apenas para o material que estava na Cuba-I, através do método de peneiração úmida. Cabe ressaltar que, na maioria das vazões ensaiadas, o material que ficou no fundo dos potes, após a secagem na estufa, apresentava pequeno diâmetro e estava em pequena quantidade, tornando-se difícil obter um volume de material compatível com o método de peneiramento para a análise granulométrica, como foi realizado para o material coletado na Cuba-I. A exceção foi o material coletado após a passagem dos $51,0\text{L.min}^{-1}$ com o canal nos 6,0%, para a qual foi possível obter, via peneiração seca, a distribuição de tamanho das partículas dos potes. Os dados serão discutidos no item 5.5.3.c..

Os parâmetros hidrossedimentométricos que foram avaliados e que serão discutidos neste tópico são a concentração de sedimentos (instantânea e acumulada), a concentração do material retido na Cuba-I, a variação do diâmetro das partículas transportadas por arraste e a perda de solo, envolvendo tanto as partículas transportadas via arraste como via suspensão.

5.2.1.- Concentração instantânea de sedimentos

As partículas sólidas que foram desagregadas, transportadas e não se depositaram na superfície do maciço, ou seja, que permaneceram em suspensão no escoamento, seguindo no

fluxo até ultrapassar os limites da Cuba-I (Figura 4.2.) e deixando o canal, foram coletadas nos potes, para a realização da quantificação da concentração de sedimentos no escoamento. Os dados referentes às concentrações de sedimentos no escoamento, nos diferentes intervalos de tempo, durante os ensaios estão no Anexo D; sua análise passa a ser descrita no que segue.

A proposta é avaliar, de forma detalhada, como ocorreu a evolução da concentração de sedimentos, nas alíquotas que foram coletadas junto da extremidade final do canal experimental, à medida que o ensaio avançava e os processos de desagregação, transporte e deposição se desenvolviam na superfície do maciço de solo.

a.- Declividade de 3,0%

Na Figura 5.14. estão colocados os gráficos referentes à passagem das vazões sobre o maciço, nos 3,0%. Nela estão identificados o tipo de escoamento predominante e o momento de incisão. De uma maneira geral, as concentrações de sedimentos tenderam a se estabilizar a partir da metade dos eventos e a concentração de estabilização ficou entre 0,03 e 0,16g.L⁻¹.

No caso das duas menores vazões, as variações na concentração instantânea ocorreram somente nos primeiros 35 minutos de ensaio. Depois desse período, a concentração tendeu à estabilização, com valores muito baixos. Entretanto, para as maiores vazões a tendência foi começar com um valor de concentração mais alto (38,5 e 51,0L.min⁻¹, com algo em torno de 0,10 a 0,12g.L⁻¹) e esse valor inicial ir diminuindo até serem atingidos os 20 minutos de duração do evento, com a concentração instantânea anterior sendo reduzida pela metade.

Este tipo de comportamento pode estar relacionado ao fato de que como a aplicação das vazões foi crescente e sucessiva, existe, no primeiro momento, a tendência de que sejam removidas partículas menores, especialmente, na passagem das vazões menores. Portanto, a partir do momento que a vazão aumenta em 85,0%, relação entre as duas vazões menores, as partículas de maior diâmetro médio serão deslocadas e transportadas, aumentando tanto o d_{50} como o teor de partículas sólidas presentes no escoamento superficial (Figura 5.2.1.).

O caso mais evidente do aparecimento de um pico de concentração, antes do final do evento, foi durante a passagem dos 51,0L.min⁻¹. Uma vez que, entre os minutos 40 e 60 a concentração instantânea dobrou. Logo depois, estabilizou-se em 0,16g.L⁻¹. Já as vazões de 25,5 e 38,5L.min⁻¹, tiveram a sua concentração instantânea estabilizada depois dos 20 minutos de ensaio e a concentração de estabilização foi de 0,03 e 0,06g.L⁻¹, respectivamente.

O processo de incisão, ocorreu durante a passagem dos 38,5L.min⁻¹, entre os minutos 25 e 30, provocou uma pequena elevação na concentração instantânea de sedimentos. A concentração passou de 0,04 para 0,06g.L⁻¹. Porém, logo em seguida, por ocasião do minuto 40, voltou ao patamar anterior, com a concentração de estabilização em torno de 0,05g.L⁻¹.

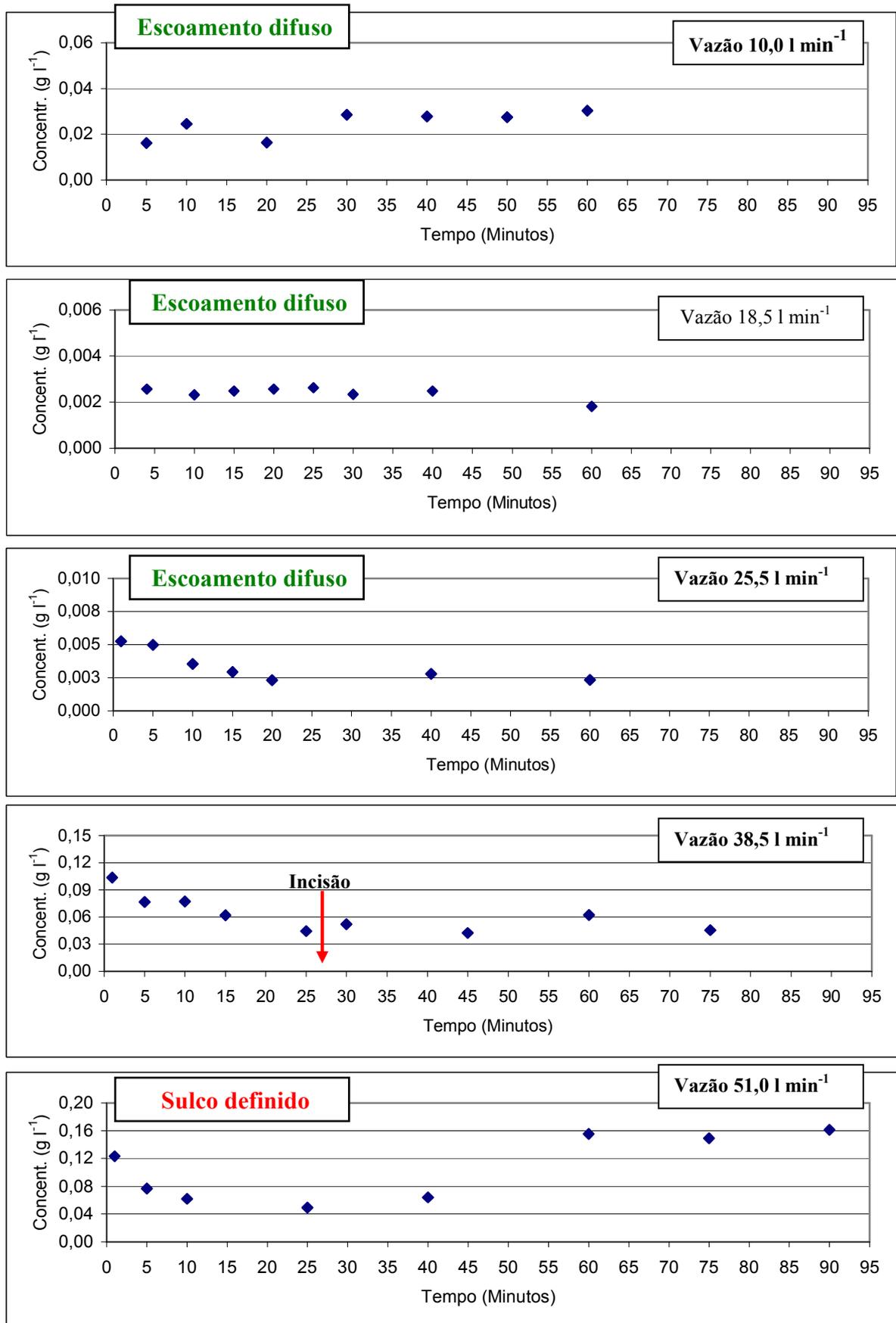


Figura 5.14.- Concentração instantânea de sedimentos no escoamento superficial no decorrer do ensaio, para as cinco vazões aplicadas sobre o maciço de solo, com o canal colocado na declividade de 3,0 %.

Nesta condição, onde a declividade do canal experimental era baixa, não se poderia esperar variações bruscas na concentração instantânea de sedimentos no fluxo, uma vez que, na declividade de 3,0%, não ocorreram todas as etapas de evolução dos sulcos de erosão. Além disso, provavelmente durante a passagem da vazão de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, a capacidade do escoamento superficial desagregar e de transportar partículas sólidas já deveria ter sido alcançada.

Desta forma, a partir deste momento o que estava ocorrendo era a fase de equilíbrio dinâmico na interação entre o fluxo que escoava e o contorno sólido, como demonstram os dados de velocidade superficial, obtidos no final deste ensaio (Figura 5.1.1. e Anexo I), os dados que representam as oscilações na altura de lâmina, após os 40 minutos de eveto, (Figura 5.1.4. e no Anexo I) e por conseqüência a própria concentração de sedimentos no fluxo superficial.

b.- Declividade de 6,0%

Na Figura 5.15. estão apresentadas as variações na concentração instantânea de sedimentos presentes no escoamento superficial durante a passagem das cinco vazões crescentes e sucessivas, com o canal experimental colocado na declividade de 6,0%.

Até ser atingida a vazão de incisão, a tendência geral foi de, nos primeiros 10 a 15 minutos do ensaio, a concentração instantânea de sedimentos cair de um valor entre $0,04$ e $0,07\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, para $0,04\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Nos 45 minutos restantes de ensaio, para as duas vazões menores, o comportamento da concentração instantânea de sedimentos foi semelhante, ou seja, nos $10,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, a concentração oscilou entre $0,04$ e $0,06\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ e, nos $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, o teor de partículas sólidas presente no escoamento, a partir dos 25 minutos de duração do segundo ensaio, foi da ordem de $0,03\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Durante a passagem da vazão de incisão ($25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$), a tendência inicial de queda na concentração instantânea foi mantida. Entretanto, logo após o minuto 15, momento da incisão, ocorreu uma pequena elevação na concentração instantânea, que permaneceu apenas por cinco minutos e depois caiu para um valor próximo de zero (minuto 35). Esta tendência de queda foi revertida no minuto 40, quando a concentração instantânea subiu para $0,03\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, sendo que a partir do minuto 45 até o final do ensaio, a concentração instantânea estabilizou em $0,04\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Nas vazões maiores que passaram sobre o maciço de solo, quando já havia sido escavado pelo menos um sulco de erosão, o comportamento da concentração instantânea de sedimentos no escoamento superficial foi totalmente diferente.

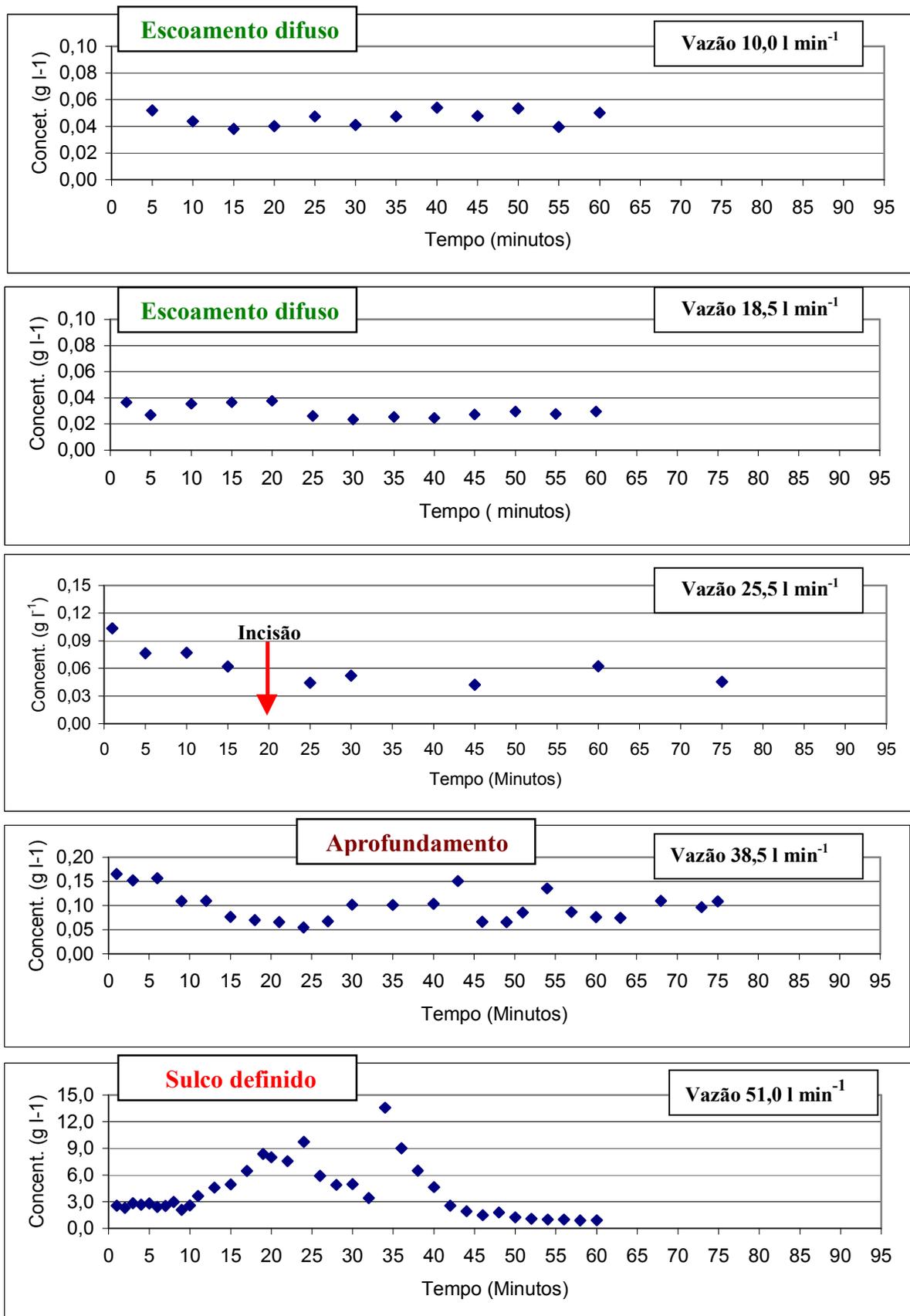


Figura 5.15.- Concentração instantânea de sedimentos no escoamento superficial no decorrer do ensaio, para as cinco vazões aplicadas sobre o maciço de solo, com o canal colocado na declividade de 6,0 %.

A mudança de tendência não é percebida apenas pelo fato dos teores de partículas sólidas no escoamento superficial dobraram de valor, mas também porque começaram a aparecer os “pulsos” de concentração de sedimento, presentes nos diversos gráficos apresentados na Figura 5.15., perceptíveis através das várias oscilações nos valores de concentração instantânea.

Este é um indício claro de que o sulco estava nas fases de aprofundamento e/ou de alargamento com a presença efetiva do processo de erosão regressiva, ocorria um maior aporte de partículas sólidas ao fluxo, as quais eram provenientes das margens e/ou do revolvimento do fundo do sulco. Desta forma, os “pulsos” representam a inversão entre os processos de erosão/deposição que revezam na superfície do maciço e que estão apresentados nas duas imagens finais da Figura 5.10., especialmente, no gráfico da vazão de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Em termos quantitativos, o comportamento da concentração de sedimentos no escoamento como resposta à passagem dos $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, foi a seguinte: começou com algo em torno de $0,15\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ até os cinco minutos, depois caiu para $0,10$ e por fim para $0,05\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, no minuto 20. A partir do minuto 27, começam a aparecer os “pulsos”, na concentração instantânea, que voltaram a atingir o valor de $0,15\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ nos minutos 43 e 53. A estabilização final da concentração começou por volta do minuto 65, com os valores médios de $0,10\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Nos $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, a maior parte do processo de desagregação e transporte ocorreu quando o escoamento superficial estava concentrado em apenas um sulco de erosão (localizado junto à borda esquerda do canal); uma vez que, antes da metade do evento final o segundo sulco já não recebia mais água.

A concentração inicial, durante a passagem dos $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, foi de $3,0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, até o minuto 10. O primeiro pico de concentração ocorreu, aos 25 minutos, com $10,0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; porém, apenas oito minutos depois, ocorreu uma redução para as $3,0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. No minuto 35, a concentração de partículas quadruplicou e atingiu $13\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Como já havia passado da metade do ensaio, a tendência foi de que os sulcos se tornassem mais estáveis e se estabelecesse, na superfície do maciço, uma condição de equilíbrio. O novo equilíbrio fez com que a concentração sofresse uma redução e, logo em seguida, se estabilizasse. Portanto, a concentração caiu, no minuto 45, para $1,5\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ e se estabilizou, a partir do minuto 50, em $1,0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

c.- Declividade de 9,0%

Observando a sequência de gráficos colocados na Figura 5.16., é possível perceber que, nos primeiros minutos da passagem das vazões sobre o maciço de solo, existem pontos em que a concentração instantânea de sedimentos foi mais alta (picos) do que os valores de estabilização final.

Na maioria dos eventos esse período é de, aproximadamente, 15 a 20 minutos e depois a concentração instantânea tende a diminuir rapidamente. Esse tipo de comportamento é confirmado pelas observações qualitativas realizadas durante cada um dos eventos, em que era possível perceber que o processo de desagregação das partículas sólidas era mais intenso na primeira metade ou no máximo até fossem completados pelo menos dois terços do tempo previsto para cada ensaio. Na parte final do ensaio, o movimento de partículas na superfície do solo era muito pequeno.

No restante do ensaio, os teores de partículas sólidas presentes no escoamento superficial ficou oscilando em torno de um valor médio e depois avançam para a concentração de estabilização. Na vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, voltam a aparecer várias oscilações na concentração, como aconteceu na vazão máxima com o canal colocado na declividade de 6,0%, sendo que a concentração de estabilização é atingida apenas nos cinco minutos finais do evento.

Nas vazões de $10,0$ e $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, a concentração inicial de sedimentos no escoamento é de $0,08\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ até o minuto 15. Na meia hora seguinte de ensaio, a concentração média ficou em torno de $0,04\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ e nos 15 minutos finais a tendência foi estabilizar, nas duas vazões menores, em $0,03\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Novamente, como na declividade de 6,0%, ocorre uma elevação na concentração instantânea de sedimentos após a incisão de pelo menos um sulco de erosão. Uma vez que, observando as concentrações geradas pela vazão de $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ (Figura 5.16.) se percebe, nos primeiros 20/25 minutos de ensaio, que a concentração instantânea de sedimentos atinge um valor de $0,08\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, ou seja, duas vezes maior do que a concentração de estabilização da vazão anterior.

As concentrações medidas a cada cinco minutos de ensaio foram extremamente baixas, porque, para as vazões de $10,0$ e $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, o processo de infiltração de água através do maciço de solo foi mais intenso e, com isso, a capacidade do escoamento superficial de causar tanto a desagregação como o transporte de partículas de solo na superfície do maciço de solo foi muito pequena, mesmo que, neste caso, a declividade do canal experimental fosse a máxima.

Na passagem das vazões de $25,5$ e $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, o comportamento descrito pelas curvas de concentração instantânea de sedimentos no escoamento, foi semelhante. Embora, como fosse de se esperar, a concentração de partículas sólidas no escoamento nos $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ fosse superior àquela encontrada nos $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. O fato do desenho das curvas ser parecido é um indicativo de que os sulcos estavam em fase de transição, ou seja, na fase de aprofundamento e/ou alargamento.

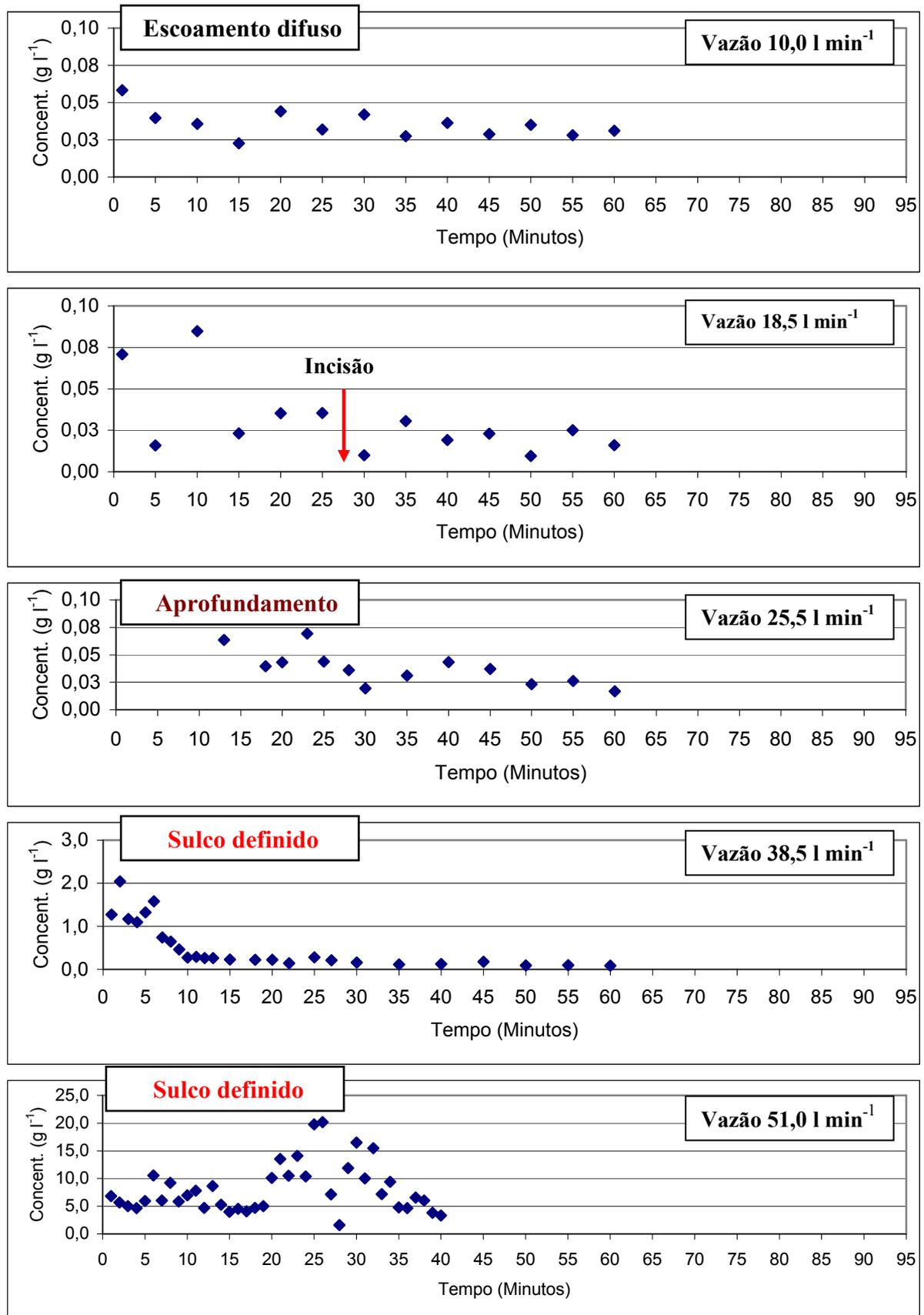


Figura 5.16.- Concentração instantânea de sedimentos no escoamento superficial no decorrer do ensaio, para as cinco vazões aplicadas sobre o maciço de solo, com o canal colocado na declividade de 9,0 %.

Nos primeiros 10 minutos do ensaio, na vazão de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, o teor de partículas presentes no escoamento foi até quatro vezes superior àquele encontrado quando da passagem dos $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. O incremento de 50,0% na vazão, fez com que o sulco localizado na borda direita do canal aprofundasse até 7,0cm na segunda seção. A partir dos 15 minutos, a concentração instantânea praticamente não sofreu nenhuma alteração, se mantendo até o final oscilando entre $0,05$ e $0,02\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ nos $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ e $0,1\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ nos $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Na passagem dos $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, até o minuto 20, a concentração média de sedimentos no escoamento foi de $5,0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, com picos de $10,0$ e $9,0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ nos minutos 6, 8 e 13, respectivamente. No período decorrido entre os minutos 20 e 24, a concentração instantânea ficou oscilando entre 10 e $15,0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ preparando o maior pico entre os 15 eventos realizados, o seja, $20,0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ nos minutos 25 e 26, momento em que os processos de erosão regressiva estavam atuando de forma intensa na superfície do maciço de solo, fazendo com que os dois sulcos retrocedessem rapidamente em direção ao ponto de entrada de água.

No período entre os minutos 27 e 35, as oscilações retornaram com muita intensidade, como fica demonstrado pela evolução desta seqüência: no minuto 28 concentração de $1,0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; no minuto 30, teores de $18,0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ e nos minutos 33 e 34, uma concentração instantânea de $9,5\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Nos últimos cinco minutos, a concentração estabilizou em $5,0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Portanto, essas mudanças bruscas na concentração instantânea de sedimentos no escoamento superficial demonstram que a opção por reduzir o tempo de duração do último ensaio realizado, para apenas 40 minutos, foi acertada, uma vez que existia a possibilidade concreta de ocorrer um novo pico extremo e o processo de desagregação, resultado do processo de erosão regressiva, ser tão intenso que o fundo do sulco, localizado junto à borda direita do canal, atingisse o filtro de proteção colocado junto ao fundo do canal, prejudicando a avaliação dos efeitos da passagem da vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal colocado na declividade de 9,0%.

Estudo conduzido por Zhu *et al.* (1995) em canal de laboratório em cinco solos do meio oeste americano, simulando o fluxo concentrado em sulcos e comparando os efeitos da erosão junto ao fundo com os efeitos da erosão regressiva, demonstrou que o processo de erosão regressiva foi a principal forma pela qual ocorreu a desagregação do solo colocado no canal, após o escoamento já estar canalizado.

5.2.2.- Concentração acumulada de sedimentos ao longo do ensaio

Na Figura 5.17. são apresentadas, de forma acumulada, a variação de concentração dos sedimentos no escoamento superficial, expressa em $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, para as três declividades, ao longo do tempo de duração dos eventos, sendo que cada ponto corresponde ao valor acumulado da

concentração de sedimentos no fluxo que passou pela extremidade final do canal naquele instante.

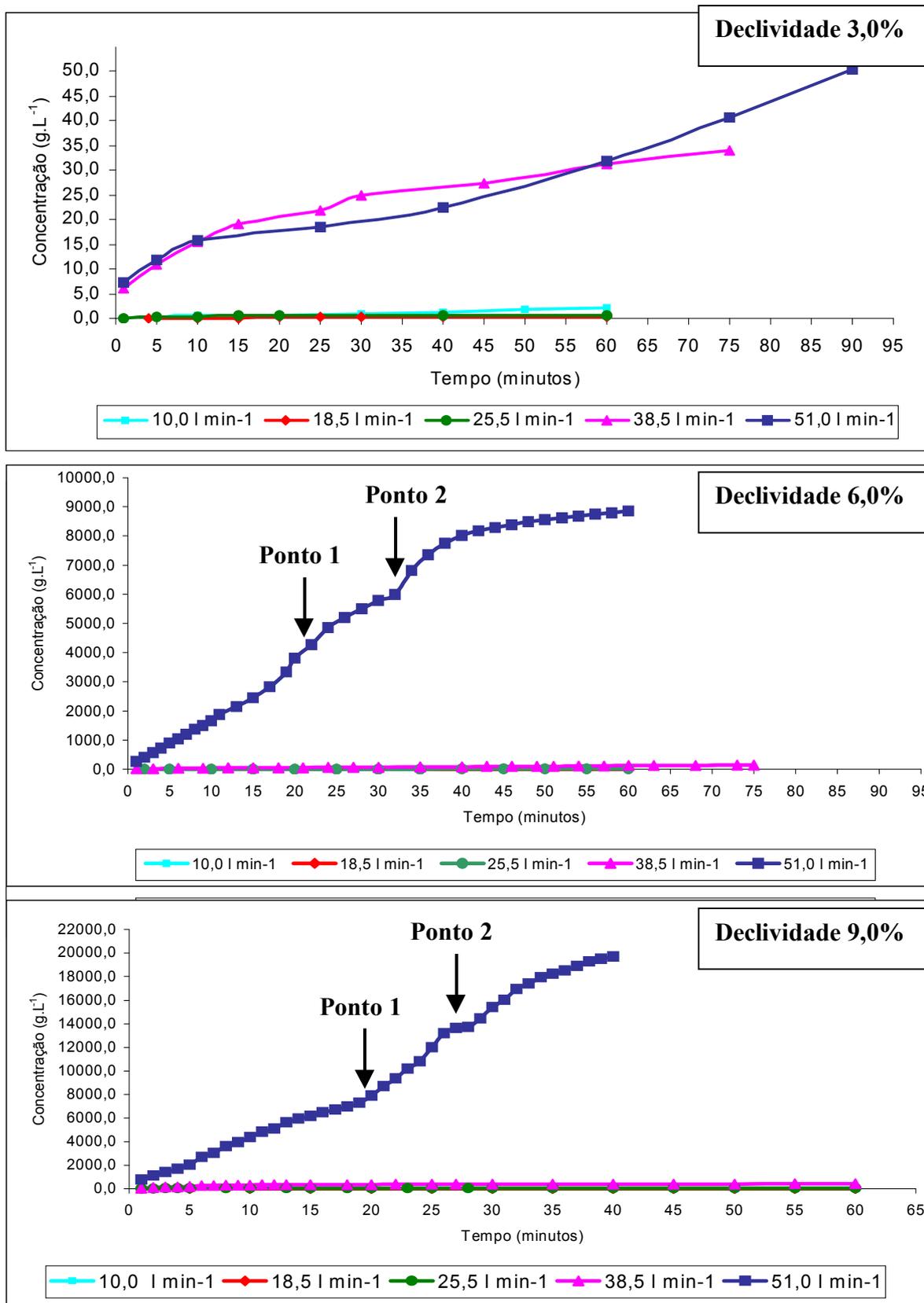


Figura 5.17.- Evolução da concentração acumulada de sedimentos no escoamento superficial, para as três declividades, quando da aplicação das cinco vazões crescentes sobre o maciço de solo.

Nos ensaios realizados com o canal colocado na declividade de 3,0%, a concentração acumulada de sedimentos sofreu maior acréscimo naquelas vazões onde foi observada a incisão e o desenvolvimento de pelo menos um sulco, no caso, foi de 38,5L.min⁻¹. A concentração acumulada inicial, tanto para a vazão em que ocorreu a incisão, como para a vazão máxima ensaiada, que estava em torno de 5,0g.L⁻¹, evoluiu rapidamente durante o ensaio e, nos instantes finais dos eventos, atingiu 33,0g.L⁻¹ nos 38,5L.min⁻¹ e 52,0g.L⁻¹ nos 51,0L.min⁻¹.

Na declividade de 3,0%, observa-se que a evolução da concentração acumulada de sedimentos para as vazões de 10,0; 18,5 e 25,5L.min⁻¹ é praticamente a mesma representando uma pequena quantidade de sedimento em transporte. A análise qualitativa deste ensaio indica que o processo de evolução dos sulcos passou direto da fase de incisão para a fase de sulco definido, sugerindo que a ausência da etapa de aprofundamento pode ter sido devido ao fato de que a energia do escoamento superficial era baixa. Portanto, a sua capacidade de desagregar e transportar as partículas existentes na superfície do maciço também era pequena.

Analisando a evolução da concentração acumulada para a declividade de 6,0% (Figura 5.17.) se percebe que a vazão de 51,0L.min⁻¹ gerou muito mais sedimento que as demais. As observações qualitativas realizadas durante os eventos permitem afirmar que, para a associação entre a declividade de 9,0% e a vazão de 51,0L.min⁻¹, os dois pontos onde ocorre uma mudança na tendência de crescimento da curva de concentração acumulada, coincidem com os momentos em que está ocorrendo o processo de erosão regressiva, que provoca tanto o revolvimento do fundo como a queda das paredes do sulco.

No primeiro momento (Ponto 1), as partículas sólidas são destacadas do fundo e das paredes dos dois sulcos de erosão existentes na superfície do maciço (Figura 5.17.). Entretanto, no segundo momento (Ponto 2), os processos de desagregação e de transporte estão sendo realizados apenas no sulco localizado junto à borda esquerda do canal, uma vez que este sulco, por apresentar maiores dimensões, alcançou a zona de transição (primeira seção) e foi além, chegando até a entrada de água (Cuba II), gerando uma concentração acumulada que chegou a, aproximadamente, 9.000,0g.L⁻¹.

Abstraindo os valores de concentração gerados, tanto na declividade de 9,0% quanto na de 6,0%, o comportamento da curva de concentração acumulada de sedimentos foi semelhante. As mudanças de tendência na curva referente aos 51,0L.min⁻¹ foram, primeiramente, devido ao fato de, a partir dos 15/20 minutos de duração do evento, o processo de erosão regressiva ser de grande magnitude, e logo depois de serem passados pouco mais de 30 minutos de ensaio, os dois sulcos presentes na superfície do maciço de solo, nas duas declividades, avançarem sobre a zona de transição e atingirem a entrada de água (Cuba II),

provocando um destacamento de partículas ainda maior e um progressivo aumento na concentração acumulada de sedimentos no fluxo atingindo mais de 20.000g.L^{-1} , na máxima declividade, quando da interrupção do ensaio.

Desta forma, é possível dizer que para a declividade de 6,0%, a passagem da vazão de $38,5\text{L.min}^{-1}$ pode ser considerada como sendo um momento crítico para o aumento da concentração acumulada de sedimentos. Uma vez que, foi durante a passagem desta vazão que começou o processo de aprofundamento e alargamento do(s) sulco(s) de erosão. Portanto, para o caso das duas menores declividades, o comportamento das curvas representativas da concentração acumulada de sedimentos é função direta da presença ou não do(s) sulco(s) de erosão.

Na declividade de 9,0% ocorreu, nas duas vazões menores, a presença de escoamento sub-superficial, discutido no tópico 5.1.5. e mostrado nas Figura 5.11., criando uma condição para que a concentração acumulada de sedimentos no escoamento superficial fosse pequena. A partir da aplicação da terceira vazão, ou seja, os $25,5\text{L.min}^{-1}$ é que a concentração acumulada de sedimentos aumenta.

Na última vazão, $51,0\text{L.min}^{-1}$, mesmo com o evento sendo finalizado 20 minutos antes do tempo previsto, é possível, pela observação da Figura 5.17., perceber uma tendência de estabilização da concentração acumulada de sedimentos no escoamento superficial. Já que, o incremento de partículas sólidas no fluxo estão se mantendo praticamente constantes, mesmo que esta seja a situação mais crítica em termos de capacidade desagregadora do escoamento superficial de todos os eventos simulados.

5.2.3.- Concentração média de sedimentos do material retido na Cuba-I

Na Tabela 5.6. estão apresentados dados representativos da massa de solo acumulada na cuba coletora (Cuba-I), bem como a concentração média relativa a esta quantidade, obtida distribuindo-a ao longo do tempo de duração do ensaio e pela vazão escoada sobre o maciço de solo.

Considerando que as condições de escoamento com o canal disposto na declividade de 3,0% são as de menor energia para desagregar e transportar as partículas sólidas, o fato da variação da concentração média para esta declividade apresentar, para a maioria das vazões, a menor concentração de sedimentos, especialmente nos $18,5$ e $25,5\text{L.min}^{-1}$, não é algo inesperado, ou seja, os dados médios de concentração de sedimentos no escoamento obtidos, nesta etapa dos ensaios, espelham claramente esta tendência.

Avaliando as concentrações médias obtidas na declividade de 3,0% nota-se que, quando da passagem da menor vazão, a concentração média de sedimentos foi superior àquela

registrada para as vazões subseqüentes, ou seja, os 18,5 e os 25,5L.min⁻¹. Tal fato pode ter sido originado pela presença de material fino sobre a superfície do maciço de solo, que foi "lavado" quando sujeito à ação do primeiro escoamento. Após, observa-se que as vazões de 18,5 e 25,5L.min⁻¹ produziram praticamente a mesma quantidade de material, enquanto que para as duas vazões maiores houve um acréscimo na concentração média dos sedimentos coletados.

Tabela 5.6.- Quantidade de solo retida na Cuba-I e concentração média de sedimentos para cada um dos eventos simulados no canal de declividade variável, indicando a vazão de incisão.

Declividade (%)	Vazão (L.min ⁻¹)	Duração do evento (Minutos)	Massa de solo na Cuba-I (g)	Concentração média (g.L ⁻¹)
3,0	10,0	60,0	8,60	0,0143
	18,5	60,0	6,81	0,0061
	25,5	60,0	11,11	0,0073
	38,5	75,0	41,27	0,0143
	51,0	90,0	672,28	0,1465
6,0	10,0	60,0	4,87	0,0081
	18,5	60,0	7,67	0,0069
	25,5	60,0	13,73	0,0090
	38,5	75,0	1.068,48	0,3701
	51,0	60,0	29.555,07	9,6585
9,0	10,0	60,0	9,47	0,0158
	18,5	60,0	103,07	0,0929
	25,5	60,0	1.888,48	1,2343
	38,5	60,0	7.711,19	3,3382
	51,0	40,0	36.388,01	17,8373

A redução em 20 minutos no tempo de ensaio fez com que a concentração média de sedimentos nos 51,0L.min⁻¹ dos 9,0% fosse de 17,84g.L⁻¹, praticamente o dobro daquela ocorrida nos 6,0% (9,66g.L⁻¹). A elevação na concentração média não foi tão expressiva como havia acontecido quando da passagem da vazão máxima nas duas declividades menores, ou seja, de 0,15g.L⁻¹ nos 3,0% para 9,66g.L⁻¹ nos 6,0%. Um dos motivos para esse tipo de comportamento foi que o escoamento superficial, no evento final, apresentava a máxima capacidade desagregadora e, naquele momento, o fluxo já estava concentrado nos sulcos existentes na superfície do maciço. Desta forma, o término antecipado do evento não permitiu que um processo de desagregação mais intenso ocorresse e que a concentração de sedimentos no fluxo aumentasse ainda mais na última vazão dos 9,0%.

Após a fase de incisão, com a presença dos micro-canais, a desagregação torna-se acelerada e com isso a concentração de sedimentos no fluxo sobe; aumentando cada vez mais nas fases de aprofundamento e/ou alargamento dos sulcos, especialmente, com a presença do processo de erosão regressiva, do processo de solapamento e da erosão nas margens e no fundo do sulco em formação, produzindo um aumento na concentração de partículas sólidas no fluxo e na carga de sedimentos transportados. O mesmo tipo de comportamento foi observado por Braida (1994), em experimento com sulcos pré-formados no campo. Além disso, ao longo de um sulco de erosão em desenvolvimento, podem existir diversos pontos, onde esteja presente pelo menos um “foco” de erosão regressiva. Neste local, o processo erosivo deverá ser mais intenso. Portanto nestes pontos, onde a erosão regressiva se desenvolve, deverá ocorrer as maiores perdas totais de solo (MEYER *et al.* 1975).

5.2.4.- Curvas granulométricas do material coletado na Cuba-I

Na fase de colocação do Latossolo Vermelho distrófico típico no canal, foram tomados alguns cuidados para que o material formador do maciço apresentasse um padrão razoavelmente uniforme em termos de tamanho, mesmo que não se utilizasse um processo de peneiração prévia, sendo que o d_{50} do material que formou o maciço foi da ordem de 3,85mm.

O material coletado na Cuba-I foi analisado sob o ponto de vista granulométrico. Na Tabela 5.7. são apresentados alguns diâmetros característicos levantados. Nota-se, que para uma mesma declividade, uma tendência de aumento no tamanho das partículas com a elevação da vazão. Também à medida que aumenta a declividade do canal experimental, aumenta o d_{50} .

Na Figura 5.18., são apresentados valores médios d_{50} do material, retido na Cuba-I, que foi desagregado e transportado pelo escoamento, para as cinco vazões crescentes e sucessivas, em cada uma das declividades de trabalho. O comportamento das três curvas demonstra que após a passagem da vazão de incisão, nas três declividades, existe um aumento no d_{50} das partículas desagregadas e transportadas pelo escoamento superficial, sendo que o menor incremento foi da ordem de 30,0% com o canal colocado na declividade de 9,0%.

A observação dos dados relativos ao d_{50} das partículas transportadas pelo escoamento, apresentados na Figura 5.18. e na Tabela 5.7., permite perceber que para a declividade de 3,0% as partículas com maior diâmetro chegaram até a cuba coletora somente depois da passagem das vazões máximas, ou seja, durante e após o estabelecimento do processo de incisão. Portanto, na declividade de 3,0% as partículas com maior d_{50} foram transportadas quando o escoamento superficial já estava canalizado e em regime turbulento.

Tabela 5.7.- Diâmetros característicos do material desagregado e transportado pelo escoamento e coletado diretamente na Cuba-I, indicando a vazão de incisão.

Declividade (%)	Vazão (L.min ⁻¹)	d ₁₀ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₆₅ (mm)
3,0	10,0	---	---	---
	18,5	0,02	0,14	0,27
	25,5	0,04	0,35	0,55
	38,5	0,05	0,37	0,60
	51,0	0,09	0,59	0,90
6,0	10,0	0,02	0,13	0,18
	18,5	0,02	0,10	0,17
	25,5	0,02	0,11	0,18
	38,5	0,05	0,38	0,79
	51,0	0,04	0,70	1,25
9,0	10,0	0,02	0,08	0,13
	18,5	0,04	0,22	0,39
	25,5	0,05	0,29	0,68
	38,5	0,07	0,51	0,78
	51,0	0,06	0,61	1,25
Média		0,04	0,33	0,58
Desvio Padrão		0,02	0,20	0,37

Na Figura 5.18. se percebe que, para as três declividades, a vazão de 38,5L.min⁻¹ foi aquela a partir da qual a interação entre o escoamento e o contorno sólido permitiu que o escoamento adquirisse uma energia capaz de desagregar e de transportar partículas maiores. Nos 9,0%, o diâmetro médio das partículas na Cuba-I, após os 38,5L.min⁻¹, foi de 0,51mm.

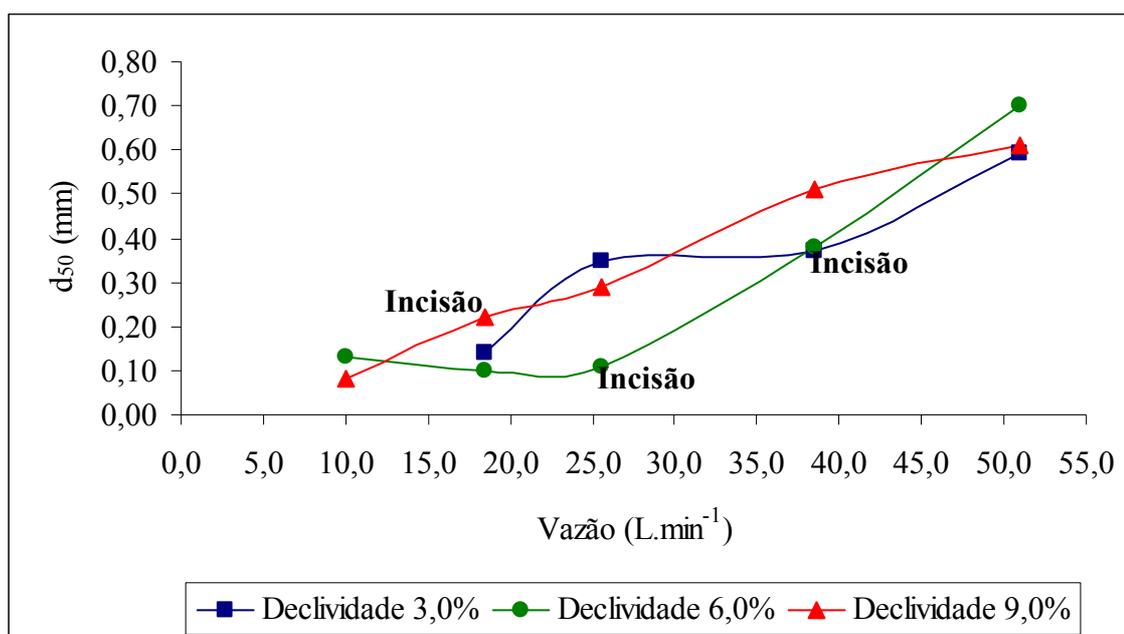


Figura 5.18.- Comportamento do diâmetro médio das partículas (d₅₀) do material coletado na Cuba-I após o final de cada um dos eventos simulados no canal, indicando as vazões de incisão.

Na declividade de 9,0%, a evolução do d_{50} das partículas coletadas foi rápida respondendo de forma imediata aos incrementos na vazão. Apenas na vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ é que houve uma redução no diâmetro médio das partículas em relação à declividade de 6,0%. Mas este comportamento, como já foi comentado anteriormente, foi devido à redução da duração do evento. A parada do ensaio se deu exatamente na fase em que de escoamento já se encontrava canalizado e com plenas condições de provocar erosão regressiva e queda das paredes do(s) sulco(s), agregando ao fluxo partículas com maior diâmetro.

Logo a seguir serão apresentadas, nas Figuras 5.19., 5.20. e 5.21., as curvas granulométricas referentes ao material que foi coletado na Cuba-I, naqueles eventos que criaram as condições ideais para que as partículas fossem desagregadas e transportadas pelo fluxo conseguissem chegar até o final do maciço de solo, ou seja, na cuba coletora.

a.- Declividade de 3,0%

Na Figura 5.19., é possível perceber que as vazões intermediárias, ou seja, de 25,5 e $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ apresentaram um comportamento muito semelhante, com as duas curvas praticamente unidas, ou seja, com um diâmetro da ordem de 0,35 e 0,37mm, respectivamente.

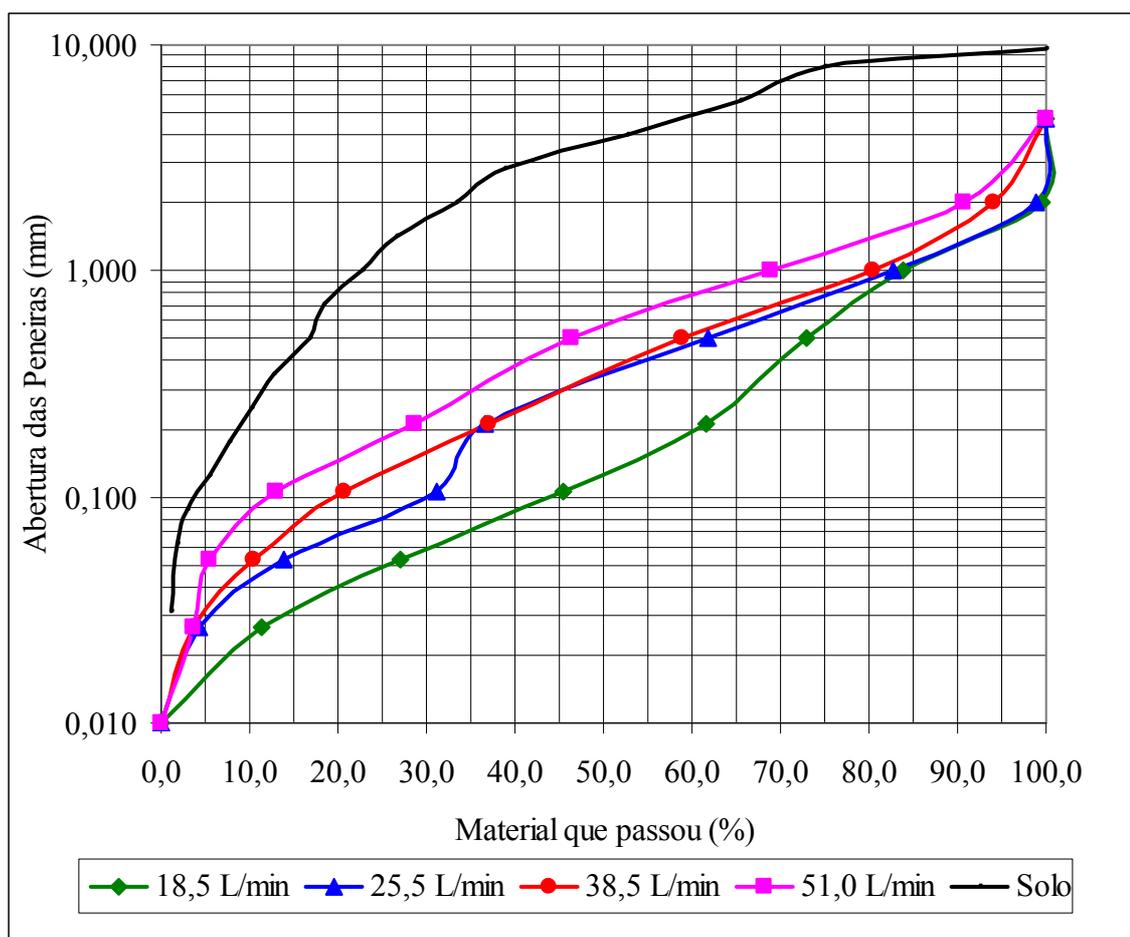


Figura 5.19.- Curva granulométrica do material desagregado e transportado pelo escoamento superficial, para cada uma das vazões aplicadas sobre o maciço de solo, com o canal colocado na declividade de 3,0%.

Observando-se a Figura 5.19. se percebe que, nas baixas vazões, são transportadas apenas partículas com d_{50} da ordem de 0,14mm (prontamente disponíveis na superfície do maciço de solo após a conformação do maciço) ou então as partículas sólidas apenas se transferem de seção dentro do próprio canal. O comportamento das curvas granulométricas representativas das vazões de 25,5 e 38,5L.min⁻¹ foi muito semelhante, com um d_{50} médio de 0,36mm. A passagem da vazão máxima fez com que o diâmetro das partículas presentes na cuba coletora fosse 60,0% superior àquele encontrado para os 38,5L.min⁻¹ chegando a 0,59mm. Portanto, o comportamento das curvas granulométricas, na declividade de 3,0%, demonstra que com o aumento da energia do escoamento superficial, a resposta da interação entre o fluxo com o contorno sólido foi a geração de três granulometrias de material diferentes.

Entretanto, para os diâmetros superiores a 1,0mm, a tendência é a redução da variabilidade dos diâmetros do material coletado na Cuba-I (Figura 5.19.). Este tipo de comportamento demonstra que, no caso de baixas declividades, mesmo com os vários incrementos realizados na vazão, não foi possível provocar um aumento na energia do escoamento suficiente e capaz de produzir a desagregação e o transporte das partículas com maior diâmetro, confirmando, para solo de textura argilosa, a proposição realizada por Brian e Poesen (1989) de que, em declividades iguais ou inferiores a 3,0%, a desagregação de partículas é pequena. Se por acaso, houve desagregação de partículas de maior diâmetro fica evidente que o escoamento não foi capaz de, naquele momento, transportá-las para a Cuba-I, ou seja, essas partículas ficaram depositadas na superfície do solo.

Na Figura 5.19. não está presente a curva da vazão de 10,0L.min⁻¹, porque, devido à baixa capacidade de desagregação do escoamento e da inversão entre os processos de erosão/deposição sobre o maciço de solo, houve um pequeno acúmulo de material na Cuba-I, produzindo um volume de material inferior ao necessário para a análise granulométrica.

b.- Declividade de 6,0 %

A partir das curvas granulométricas apresentadas na Figura 5.20. pode-se distinguir dois grupos de curvas, demonstrando novamente a importância do processo de incisão de pelo menos um sulco de erosão para fazer com que fosse aumentada a granulometria do material que foi transportado e que ficou retido na cuba coletora.

A passagem das cinco vazões crescentes e sucessivas sobre o maciço de solo, com o canal colocado na declividade de 6,0%, fez com que fossem gerados dois grupos distintos de curvas granulométricas: aquele gerado por , ou seja, as vazões até 25,5L.min⁻¹ (vazão de incisão) e aquele gerado pelas duas vazões máximas (Figura 5.20.). No grupo das baixas

vazões, o d_{50} é da ordem de 0,113mm, com d_{70} e os diâmetros característicos acima do d_{90} praticamente os mesmos. No grupo das altas vazões, o d_{50} é de 0,38mm para os 38,5L.min⁻¹ e de 0,70mm para os 51,0L.min⁻¹ e, ao contrário das baixas vazões, existe uma variabilidade um pouco maior nos diâmetros característicos.

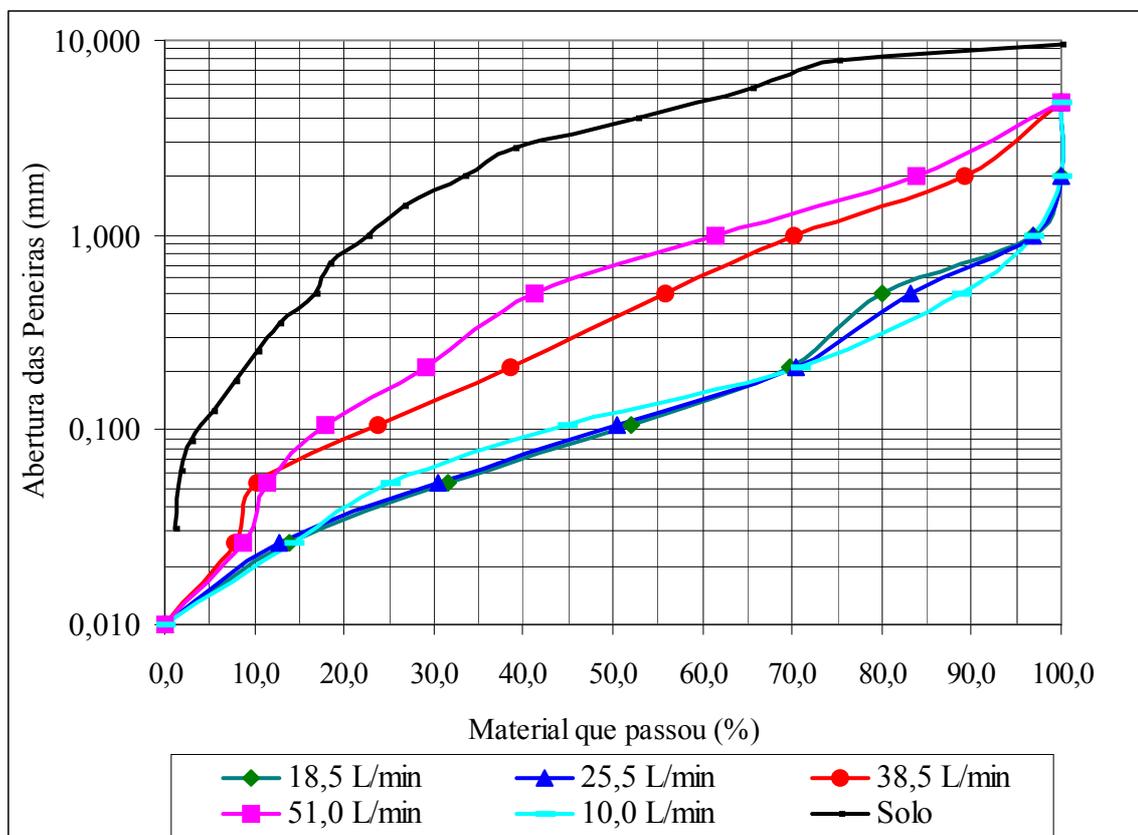


Figura 5.20.- Curva granulométrica do material desagregado e transportado pelo escoamento superficial, para cada uma das vazões aplicadas sobre o maciço de solo, com o canal colocado na declividade de 6,0%.

O segundo grupo de curvas granulométricas, gerado pelas vazões maiores: 38,5 e 51,0L.min⁻¹ (Figura 5.20.). Representa a ação de um escoamento superficial já canalizado; portanto, avançando dentro de um sulco já estabelecido e em fase de aprofundamento e/ou alargamento, dependendo da sua condição evolutiva. O fluxo que escoou sobre o maciço quando da passagem da vazão máxima, estava quase que totalmente canalizado, fazendo com que o d_{50} das partículas coletadas fosse 85,0% superior àquele valor obtido para o material coletado após a passagem da vazão de 38,L.min⁻¹.

c.- Declividade de 9,0%

Estão descritas na Figura 5.21., as curvas granulométricas referentes ao material que foi coletado na Cuba-I após a passagem das cinco vazões, com o canal colocado na máxima declividade. Com o canal na declividade de 9,0%, cada uma das vazões de trabalho poderia expressar a sua máxima capacidade desagregadora e, desta forma, ser capaz de produzir cinco

diferentes faixas de diâmetro de partículas desagregadas e transportadas pelo escoamento superficial.

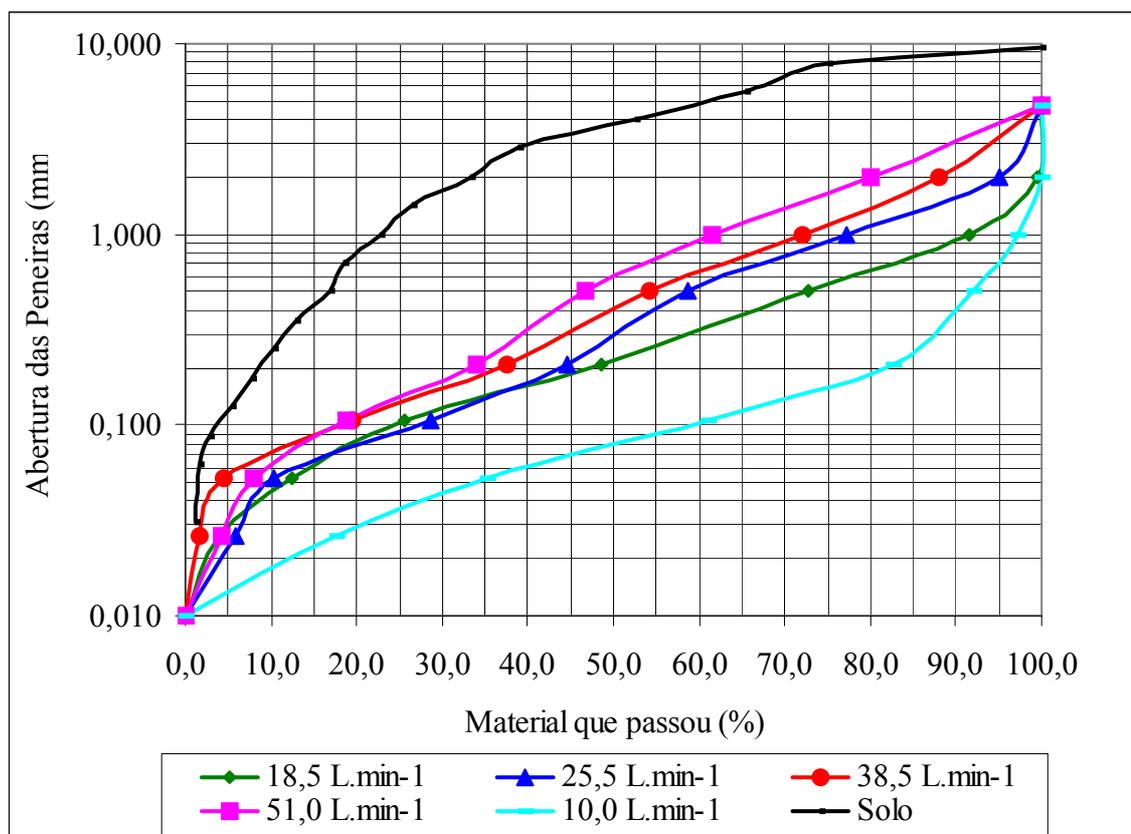


Figura 5.21.- Curva granulométrica do material desagregado e transportado pelo escoamento superficial, para cada uma das vazões aplicadas sobre o maciço de solo, com o canal colocado na declividade de 9,0%.

Essa expectativa inicial foi confirmada, especialmente, para os diâmetros superiores aos 0,20mm, já que, observando a Figura 5.21., se percebe as cinco curvas granulométricas individualizadas por vazão. Entretanto, no caso dos diâmetros menores ou iguais aos 0,20mm, a variabilidade dos diâmetros das partículas do material desagregado e transportado pelo escoamento superficial foi pequena. Um indicativo desta baixa variabilidade são os valores obtidos para o d_{10} (Tabela 5.7.) e o seu próprio desvio padrão.

O d_{50} do material que foi mobilizado pela vazão de 10,0L.min⁻¹ foi de 0,08mm; após a passagem da vazão de 18,5L.min⁻¹, o material que foi coletado diretamente na Cuba-I apresentou um d_{50} de 0,22mm; a vazão de 25,5L.min⁻¹, transportou para a Cuba-I material com um d_{50} de 0,29mm; o escoamento superficial já estava canalizado quando da passagem da vazão de 38,5L.min⁻¹ e por isso o d_{50} do material chegou a 0,41mm e, como as condições da passagem da vazão de 51,0L.min⁻¹ foram atípicas, o d_{50} do material desagregado e transportado pelo fluxo e que ficou retido na cuba coletora não subiu muito, foi de 0,61mm,

inferior aos 0,70mm encontrado para o material coletado após a passagem da vazão máxima, quando o canal experimental estava colocado na declividade de 6,0%.

Uma vez apresentada a variação do tamanho das partículas desagregadas e transportadas pelo escoamento, cabe estabelecer a relação entre os tamanhos de partículas e a quantidade de material que foi desagregado e chegou até a cuba coletora, representada pelas concentrações médias de sedimentos discutidas anteriormente.

O aumento na concentração média de sedimentos após a passagem da vazão de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, com o canal colocado na declividade de 3,0%, é fruto da interação entre a maior energia do escoamento superficial com o tipo de material que estava prontamente disponível para ser desagregado e transportado na superfície do maciço. O diâmetro médio das partículas coletadas na Cuba-I servirá como testemunha desta mudança; uma vez que o valor do d_{50} do material cresceu em pelo menos 2,5 vezes, passando para 0,37mm (Tabela 5.7.), em função do aumento na energia do fluxo, reflexo da elevação de 50,0% da vazão de alimentação.

Nas declividades de 6,0 e 9,0% (Tabela 5.6.), a resposta em termos de concentração média de sedimentos ao processo de incisão foi praticamente imediata. Por ocasião da passagem das vazões mais baixas, na condição de escoamento difuso, o escoamento estava distribuído uniformemente sobre a superfície do maciço de solo e apresentava uma lâmina pouco espessa. Portanto, a concentração média de partículas sólidas no fluxo se manteve em níveis baixos e estáveis. Assim, durante e logo após a passagem da vazão de $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, é que a concentração média de sedimentos começou a aumentar.

Nas Figuras 5.19.; 5.20.e 5.21. se observa uma grande diferença entre o d_{50} do solo colocado no interior do canal e o d_{50} do material coletado na Cuba-I. Tal diferença pode ser explicada pelo tipo de a metodologia adotada para a avaliação da distribuição granulométrica e, principalmente, a própria competência do escoamento superficial em desagregar e transportar as partículas e os agregados que constituíam o maciço.

A curva granulométrica do solo que foi colocado no interior do canal experimental foi obtida via peneiração seca e as curvas granulométricas do material que coletado após a passagem de cada uma das vazões sobre a superfície do solo foram obtidas via peneiração úmida. Além disso, a estrutura experimental construída para este estudo impossibilitou submeter o maciço de solo à ação de escoamentos com potência maiores do que $0,544\text{N}\cdot\text{s}$. Assim a energia do escoamento se mostrou insuficiente para desagregar e transportar as partículas e os agregados de um maciço de solo que apresentava um d_{50} de, aproximadamente, 3,85mm. Também deve-se considerar que os agregados que faziam parte do maciço e que estão em transporte/trânsito pelo canal podem se desagregar, fracionado-se em tamanhos menores.

5.2.5.- Perda de solo

Na Tabela 5.8. são apresentados os valores de perda de solo totais e parciais gerados nos ensaios. As perdas de solo parciais foram obtidas a partir das coletas realizadas diretamente na Cuba-I e a partir da concentração de sedimentos em cada um dos potes coletados no final da da Cuba-I.

Os dados apresentados na Tabela 5.8. permitem observar que a evolução da perda de solo, tanto parcial como total, em cada um dos eventos, acompanhou o aumento da declividade do canal e a elevação da vazão de alimentação, especialmente, quando o canal estava colocado na declividade de 9,0%.

Nos 6,0% de declividade, ocorreu um rápido crescimento na perda de solo total, por ocasião da passagem das duas vazões mais elevadas. Nos 3,0%, após a passagem das quatro primeiras vazões, a perda total de solo foi inferior a 300,0g e, apenas depois da passagem da vazão máxima, é que a perda de solo total superou a 1,0kg.

Tabela 5.8.- Perda de solo total e parcial para cada um dos ensaios conduzidos no canal de declividade variável sob a ação de vazões crescentes e sucessivas e a indicação da vazão de incisão.

Declividade (%)	Vazão (L.min ⁻¹)	Perda de solo(g)		
		Cuba-I	Final da Cuba-I	Total
3,0	10,0	8,60	15,10	23,70
	18,5	6,81	28,30	35,11
	25,5	11,11	36,00	47,11
	38,5	41,27	147,70	188,97
	51,0	672,28	525,23	1.197,51
6,0	10,0	4,87	27,70	32,57
	18,5	7,67	32,70	40,37
	25,5	13,73	42,50	56,23
	38,5	1.068,48	284,40	1.352,88
	51,0	29.555,07	13.070,10	42.625,17
9,0	10,0	9,47	20,30	29,77
	18,5	103,07	31,30	134,37
	25,5	1.888,82	138,40	2.027,22
	38,5	7.711,19	710,50	8.421,69
	51,0	36.388,01	16.576,00	52.964,01

Os resultados encontrados por Crouch e Novzuri (1989), que trabalharam em um canal de laboratório com as declividades de 1,8, 3,6 e 7,2% e com vazões de alimentação variando entre 2,5 a 40,0L.min⁻¹, comprovam que, nas baixas declividades, a quantidade de sedimento perdida é insignificante. Os autores justificam esse tipo de comportamento pelo fato do

escoamento formar canais de pouca profundidade, com paredes com inclinação entre 30 e 45° e sem a presença de erosão regressiva.

Neste estudo, os sulcos que se desenvolvem na superfície do maciço de solo argiloso, durante a realização dos ensaios com o canal colocado na declividade de 3,0%, apresentaram uma baixa perda de solo e, além disso, apresentaram características semelhantes aos sulcos incipientes descritos por Govers (1985) ou aos micro-canais sem erosão regressiva definidos por Merrit (1984).

Na Figura 5.22., é possível perceber que o incremento na perda de solo total é maior quando o canal estava na declividade de 6,0% do que quando estava em 9,0%, especialmente, após a passagem da vazão de 25,5L.min⁻¹. Na declividade de 6,0%, como foi referido na discussão do item 5.1.4., existe a incisão de pelo menos dois sucos na superfície do maciço de solo, durante a passagem das vazões máximas. Entretanto, apenas um deles recebe, praticamente, toda a água que alimenta o canal, fazendo com que o escoamento esteja concentrado no sulco localizado junto da borda esquerda do canal. Desta forma, já que este é o sulco que retrocedeu até o início do maciço (zona de Transição da Figura 4.2.) é nele que são mais intensos os processos de desagregação e de transporte das partículas sólidas arrancadas/destacadas, gerando uma perda total de solo é maior.

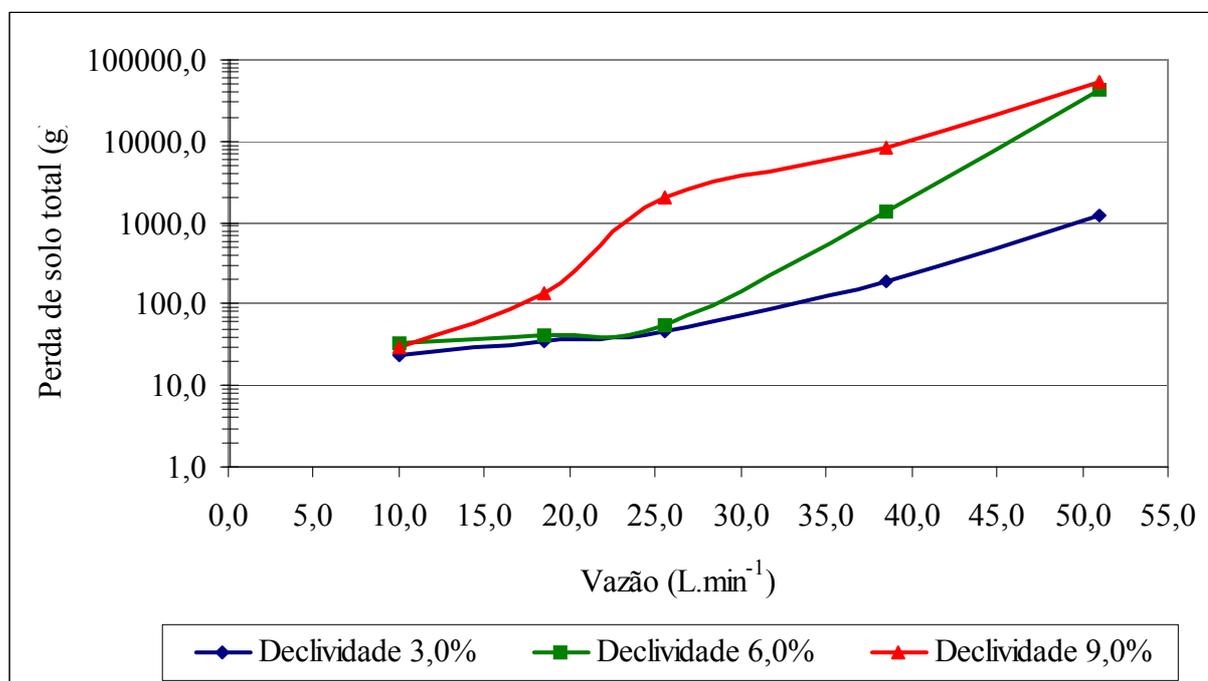


Figura 5.22.- Comportamento da perda de solo, expressa na escala logarítmica, em função da aplicação de sucessivas vazões crescentes e do aumento da declividade do canal experimental, indicando as vazões de incisão.

Na declividade de 9,0%, como na declividade anterior, existem dois sulcos de erosão. Entretanto a vazão de alimentação que entra no canal, se divide e percorre os dois sulcos em

formação; porém, nenhum deles chegou a alcançar a zona de transição (Figura 4.2.). Portanto, a vazão de alimentação do canal que anteriormente (declividade de 6,0%) estava concentrada em apenas um sulco (lado esquerdo do canal), agora nos 9,0 % está subdividida. Portanto, nesta nova conformação da superfície do solo, as partículas e os agregados que formam o maciço têm condições mais favoráveis para resistir à ação desagregadora do fluxo.

Nas declividades de 3,0 e 6,0% a perda de solo inicial, durante a aplicação da vazão de $10,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, está diretamente relacionada com a quantidade de material de granulometria mais fina que ficou prontamente disponível para ser transportado, logo após a manipulação do solo por ocasião da moldagem e do nivelamento da superfície do maciço, além da quebra de agregados que a chuva simulada provocou.

Até a passagem da vazão de $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, para as duas primeiras declividades e depois da passagem da vazão de $10,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ nos 9,0%, a variação na perda de solo total ficou entre 23,70 e 40,37g. Sugerindo que, a baixa energia do escoamento superficial fez com que houvesse erosão em uma determinada seção e na seção seguinte ocorresse a deposição das partículas que estavam em transporte. Portanto, a inversão entre os processos de erosão/deposição fez com que a maior parte do material desagregado e que estava em transporte pelo fluxo não se deslocasse para além dos limites do maciço, ou seja, apenas fosse transferido de uma seção do canal para a outra.

A inversão entre os processos de erosão/deposição já era percebida durante a realização dos ensaios. Já que, em diversos momentos, era possível visualizar agregados sendo transportados pelo fluxo por curtas distâncias, parando e voltando a se movimentar sem chagar até a Cuba-I. Além disso, exceto para os $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ nos 9,0%, o peso do material que ficou retido na Cuba-I, após a passagem das duas menores vazões, foi inferior a 10,0g indicando que a maior parte desse material ficou sobre a superfície do solo.

Nas três declividades de trabalho, após a passagem da vazão máxima, a interação entre o escoamento superficial e o substrato argiloso foi capaz de produzir uma perda de solo total que variou desde pouco mais de 1,0kg, na declividade de 3,0%, até algo em torno de 53,0kg, nos 9,0%. Na declividade de 3,0% (Figura 5.22.), a incisão de um sulco de erosão ocorreu apenas durante a passagem da vazão quarta vazão ($38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$). Já que, nos 3,0% o escoamento superficial apresentava uma baixa capacidade de desagregação em relação às demais declividades testadas a perda de solo foi muito pequena. Portanto, após a passagem dos $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, a perda de solo foi de 1,20kg (Tabela 5.8.), ou seja, aproximadamente 2,50% da perda de solo quantificada quando o canal estava colocado nas declividades de 6,0 e 9,0%.

Na declividade de 6,0% (Figura 5.22.), como a capacidade do escoamento superficial para desagregar as partículas do solo era maior, em comparação com a condição anterior, o

processo de incisão do primeiro sulco ocorreu antes, ou seja, durante a passagem da vazão de $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. Desta forma, houve uma elevação rápida da perda de solo nas vazões de $38,5$ e $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. Sendo que, a perda de solo na vazão máxima na declividade de $6,0\%$, atingiu $42,62\text{kg}$ (Tabela 5.8.), superando em mais de trinta vezes a quantidade de material que havia sido mobilizado por ocasião da passagem desta mesma vazão, com o canal na declividade de $3,0\%$.

Na declividade de $9,0\%$ (Figura 5.22.), onde estava presente a máxima energia do escoamento superficial capaz de desagregar o Latossolo, para cada uma das cinco vazões de alimentação aplicadas sobre o maciço, os incrementos na perda de solo foram maiores até a passagem da vazão de $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. Entretanto, durante a passagem da vazão de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ esta tendência da curva mudou.

Esta alteração pode ser justificada pelo fato de que, nos primeiros 15 minutos de duração do evento, ocorreu o aprofundamento do(s) sulco(s) e antes mesmo da metade do evento já era possível perceber uma condição de equilíbrio na interação entre o escoamento superficial e o contorno sólido, permitindo que fosse visualizado durante o evento que o escoamento superficial apenas revolvia o fundo do(s) sulco(s), como se observa através do comportamento da concentração de sedimento no fluxo, colocado no quarto gráfico da Figura 5.16..

No estudo realizado em laboratório por Polyakov e Nearing (2003) utilizando sulco pré-formado, buscando verificar se a concentração de equilíbrio obtida em uma situação onde é adicionado sedimento ao escoamento é diferente daquela em que não é adicionado sedimento ao fluxo, os resultados demonstraram que a concentração de equilíbrio foi alcançada, após a inversão entre os processos de erosão e de deposição, quando os pontos da curva representativa da concentração de sedimentos em função do tempo se mantiveram oscilando em torno de um valor médio, ou seja, formando uma linha paralela ao eixo do tempo.

Entretanto, quando da aplicação da vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ na declividade de $9,0\%$, a desagregação e o transporte de material foram intensos criando uma condição crítica para a continuação deste último evento; uma vez que, o maciço de solo apresentava inicialmente uma espessura de $0,20\text{m}$ e já nos primeiros 25 minutos de duração do ensaio a profundidade do sulco maior já estava por volta dos $0,14\text{m}$. Desta forma, este ensaio não teve a duração de 60 minutos como os demais, tendo a vazão de alimentação sido cortada quando eram transcorridos apenas 40 minutos de ensaio. Mas, a perda de solo nesta condição foi, aproximadamente, $25,0\%$ superior àquela ocorrida na declividade anterior durante a passagem da vazão máxima, alcançando $52,96\text{kg}$ (Tabela 5.8.).

Etapa II - Estudo do desenvolvimento dos sulcos de erosão em meio coesivo

Após serem discutidos os aspectos relacionados com o comportamento apresentado pelos parâmetros hidráulicos e hidrossedimentométricos envolvidos nos processos de desagregação e transporte ocorridos na superfície do maciço de solo durante a passagem do escoamento superficial, é importante avaliar, a partir de agora, mais detalhadamente o processo de formação do(s) sulco(s) propriamente dito.

5.3.- Formação do(s) sulco(s)

A magnitude do avanço dos diferentes processos que foram capazes de gerar o(s) sulco(s) de erosão é função dos incrementos na vazão de alimentação e na declividade do canal. Entretanto, as informações obtidas durante a realização dos ensaios devem ser complementadas com novos elementos que possam ajudar a definir os critérios básicos capazes de diferenciar as fases de evolução. A partir da definição desses critérios, a etapa seguinte é escolher entre os diversos parâmetros hidráulicos calculados aqueles que possam contribuir para a definição da amplitude de cada uma dessas etapas evolutivas.

Concluída a etapa de geração dos sulco de erosão, a partir de agora é fundamental discutir como é a dinâmica de evolução do(s) sulco(s), enfatizando os diferentes tipos de transporte de partículas sólidas, quantificando qual a participação do transporte de fundo e suspensão na carga total de sedimentos e discutindo como os sulcos gerados evoluem no espaço e no tempo. Este tópico será finalizado com uma síntese das informações obtidas procurando sistematizar as informações necessárias para identificar as diferentes fases de evolução dos sulcos.

Observa-se que, independentemente da vazão de alimentação e da declividade do canal experimental, nas condições de realização deste trabalho, o processo de formação dos sulcos de erosão teve o seu início com a presença dos caminhos preferenciais (escoamento difuso), evoluindo para os micro-canais, avançando para incisão de um pequeno sulco, logo depois seguindo para as fases de aprofundamento e/ou alargamento desse sulco e, por fim, com a presença de um sulco definido. A importância do aumento da vazão de alimentação e da declividade do canal está diretamente relacionada ao tempo de duração e à magnitude com que cada uma dessas diferentes fases do processo irá se desenvolver.

O resultados obtidos após a passagem das cinco vazões crescentes e sucessivas sobre a superfície do maciço demonstraram que, para a declividade de 3,0%, a fase de pré-incisão se prolongou até a passagem dos 25,5L.min⁻¹, enquanto que nos 6,0% foi até os 18,5L.min⁻¹ e nos 9,0% somente nos 10,0L.min⁻¹. A fase intermediária, nos 3,0%, ocorreu durante o evento dos 38,5L.min⁻¹ (sem a presença do aprofundamento). Nos 6,0%, a segunda fase evolutiva

ocorreu durante a passagem dos 25,5 e parte dos 38,5L.min⁻¹ e nos 9,0%, foi durante o ensaio dos 18,5L.min⁻¹. A fase de sulco definido nos 3,0%, ocorreu durante a passagem da última vazão; nos 6,0%, o sulco estava definido quando passou parte dos 38,5L.min⁻¹ e durante o evento dos 51,0L.min⁻¹ e, nos 9,0%, durante os ensaios de 38,5 e 51,0L.min⁻¹.

5.3.1.- Parâmetros hidráulicos capazes de definir a formação de sulcos

Os parâmetros hidráulicos potencialmente capazes de ajudar na identificação e/ou separação das fases de evolução dos sulcos de erosão foram: o número de Froude, o número de Reynolds, o coeficiente de Manning, o coeficiente de perda de carga de Darcy-Weisbach, a potência do escoamento descrita através dos conceitos propostos por Bagnold e por Yang.

Na literatura existem vários autores indicando e justificando o uso dos diversos parâmetros hidráulicos citados anteriormente. O número de Froude foi considerado como sendo um bom indicador para o início de formação de sulcos até o final dos anos 70, como indicam os trabalhos realizados por Savat e De Ploey (1982) citados por Slattery e Bryan (1991). Entretanto, para Torry *et al.* (1987) o parâmetro realmente eficaz é a tensão de cisalhamento, desconsiderando o número de Froude como um indicador eficiente. No caso de Goves (1985) e de Rauws (1987), a velocidade de cisalhamento funcionou muito bem como forma de avaliar a evolução dos sulcos.

Por fim, tanto para Rose (1988) como para Bagnold (1977) a potência do escoamento foi considerada como sendo um bom parâmetro para separar as etapas evolutivas dos sulcos. Além disso, tanto Elliot (1988) como Nearing *et al.* (1997) apontam a potência do escoamento como um bom parâmetro para estimar a carga de sedimentos; uma vez que ela apresentou melhores resultados do que, por exemplo, a tensão de cisalhamento. Os resultados obtidos por Govers e Rauws (1986) confirmaram a idéia de que a potência do escoamento é um bom estimador para a capacidade de transporte do escoamento e possibilitaram que os referidos autores indicassem o seu uso no modelo europeu de predição de perdas de solo—EuroSEM.

A partir desta breve evolução histórica é possível compreender que o entendimento do processo de formação de sulcos é crucial tanto para a predição das perdas de solo como para o efetivo controle dessas perdas (SLATTERY e BRIAN, 1991). A caracterização hidráulica do escoamento que é capaz de iniciar a formação de um sulco, ou seja, provocar a incisão na superfície do maciço de solo, torna-se fundamental para melhorar a forma de quantificar a perda de solo.

Na Tabela 5.3., os pontos de incisão, para as diferentes declividades, foram localizados no tempo e no espaço. Na Tabela 5.9., são apresentadas a potência e a velocidade de cisalhamento do fluxo durante a passagem da vazão de incisão, bem como a perda de solo

ocorrida, em cada declividade. Estes dados ajudam a ilustrar a forma pela qual as mudanças ocorridas na superfície do maciço de solo afetaram os processos de erosão/deposição, antes e depois da incisão.

Tabela 5.9. Vazão de incisão, tensão e velocidade de cisalhamento, perda de solo e percentual da perda de solo a vazão de incisão.

Declividade (%)	Vazão (L.min ⁻¹)	Tensão Cisalhamento (Pa)	Veloc. Cisalhamento (m.s ⁻¹)	Perda de solo (g)	% da Perda de solo ¹
3,0	38,5	3,50	0,059	188,97	12,6
6,0	25,5	7,28	0,086	56,23	0,13
9,0	18,5	9,18	0,096	134,35	0,21

¹- Percentual da perda total de solo na declividade, ou seja, perda de solo que ocorreu até a incisão dividida pela perda total de solo na declividade.

A elevação da tensão e da velocidade de cisalhamento do fluxo, no momento da incisão do(s) sulco(s) na superfície do maciço, resultado do aumento da capacidade desagregadora do escoamento superficial praticamente não exerceu nenhuma influência sobre a perda de solo total ocorrida naquela declividade. A participação da perda de solo ocorrida nos 25,5L.min⁻¹ representou apenas 0,13% da perda total dos 6,0% (44,11kg) e perda de solo quantificada nos 18,5L.min⁻¹ representou apenas 0,21% da perda total de solo ocorrida na máxima declividade (63,58kg). Esse tipo de comportamento já era esperado, uma vez que as maiores perdas de solo, por evento, ocorrem a partir do momento em que os sulcos estão em desenvolvimento, ou seja, quando as fases de aprofundamento e alargamento são mais intensas.

Também, a partir da análise das informações referentes ao momento da incisão para cada declividade (Tabelas 5.3. e 5.9.), pode-se observar que, conforme aumenta a declividade do canal, a incisão ocorre com menor vazão e nos 15 a 30 minutos iniciais do evento. Além disso, o ponto de incisão se aproxima da entrada de água, à medida que aumenta a tensão de cisalhamento. Na comparação dos resultados obtidos nos trabalhos desenvolvidos por Rauws (1987) e Govers (1987) com os dados encontrados neste estudo, observa-se que a velocidade de cisalhamento do escoamento superficial mínima registrada para a incisão de sulco no Latossolo é 0,059m.s⁻¹, ou seja, praticamente, o dobro do valor sugerido pelos dois pesquisadores, indicando que a coesão existente entre as partículas do substrato argiloso tornasse necessário mais energia para vencer a resistência do solo.

As mudanças ocorridas nas características do fluxo, no d₅₀ e na perda de solo antes e depois da incisão de pelo menos um sulco de erosão na superfície do maciço de solo estão apresentadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10.- Comparação entre os valores médios do d_{50} , do número de Reynolds, da tensão de cisalhamento e da descarga sólida antes e após a incisão de pelo menos um sulco de erosão, para as três declividades.

Declividade (%)	d_{50} (mm)		Número de Reynolds		Tensão de Cisalhamento (Pa)		Perda de solo (g)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
3,0	0,28	0,59	928	1487	1,26	4,09	294,89	1197,51
6,0	0,11	0,54	583	3048	5,70	8,77	129,17	43978,05
9,0	0,15	0,44	2520	3817	7,08	12,28	164,14	63412,92
Média	0,18	0,52	1344	2784	4,68	8,38	196,07	36196,16

Nota-se que, após a incisão, a tensão de cisalhamento se eleva em pelo menos 60,0%, o d_{50} do material coletado na Cuba-I dobra de valor; o regime de escoamento nos 6,0 e nos 9,0% passa a ser turbulento, quando antes era de transição. A perda de solo média cresceu, aproximadamente, 185 vezes entre antes e depois da incisão de pelo menos um sulco na superfície do maciço, ou seja, a partir do momento em que o escoamento se tornou canalizado.

Na busca de identificação de parâmetro(s) hidráulico(s) capaz(es) de refletir o momento da incisão de um sulcos de erosão, ou seja, a passagem de um fluxo difuso para canalizado, a perda de solo total foi confrontada com os diferentes parâmetros hidráulicos avaliados nos ensaios. Adotou-se como critério aquele que melhor descreveu o crescimento da perda de solo total e que também foi capaz de melhor diferenciar as fases evolutivas do processo de geração de sulcos. Num primeiro momento, foram plotados cada um dos parâmetros hidráulicos contra a perda de solo, quantificada nos eventos. A etapa seguinte, consistiu na comparação entre os coeficientes de determinação (R^2) das tendências ajustadas para cada um dos parâmetros testados. Entretanto, não foi esquecida a análise da representatividade física do parâmetro discriminador e, para finalizar o comparativo, foi avaliado o seu valor numérico, em relação aos valores encontrados na literatura.

A partir das discussões já realizadas, se percebe que existe um comportamento diferenciado da perda de solo antes e depois do fluxo estar canalizado. Portanto, a correlação entre a perda de solo e a tensão de cisalhamento foi realizada para a condição de sulco nas fases de pré-incisão e intermediária, já que, na fase de sulco definido, os pontos existentes não são suficientes para uma análise conclusiva. A correlação realizada, visando a separação de cada uma das fases evolutivas, foi montada com todos os pontos obtidos nos ensaios.

Os melhores resultados obtidos para descrever a evolução da perda de solo ocorrida nas três declividades e após a passagem das cinco vazões, foram aqueles apresentados pela

tensão de cisalhamento, pela potência do escoamento (expressão **3.19**) e pela potência do escoamento calculada pelo critério proposto por Bagnold ($P_e = \tau.v$). Na Tabela 5.11. estão apresentados alguns dos resultados obtidos; os demais parâmetros avaliados apresentaram um R^2 abaixo de 0,19.

Tabela 5.11.- Resumo das correlações encontradas entre a perda de solo e os diferentes parâmetros hidráulicos testados, na busca do melhor descritor da evolução da perda de solo.

Parâmetro	Expressão*	n	a	b	R^2
Tensão de cisalhamento	$Y = a.x^b$	15	0,0289	1,2656	0,9149
Potência do escoamento	$Y = a.x^b$	15	5,7755	2,2667	0,6993
Potência segundo Bagnold	$Y = a.x^b$	15	0,2694	1,35	0,5297
Número de Reynolds	$Y = a.x^b$	15	0,0002	0,9701	0,1884

* onde: x representa o parâmetro em estudo e y a perda de solo.

Portanto, o parâmetro escolhido para descrever a evolução da perda de solo em função do aumento da declividade e da vazão foi a tensão de cisalhamento do fluxo. O parâmetro escolhido para fazer a separação entre as diferentes fases de evolução dos sulcos foi a potência do escoamento, uma vez que a tensão de cisalhamento não foi eficiente para definir os limites entre cada uma das fases. Os resultados das correlações obtidas estão apresentados na Tabela 5.12.. A perda de solo se correlacionou com a tensão de cisalhamento (coeficientes apresentados na Tabela 5.11) através da expressão: $PS = 0,289.(\gamma.H.I_e)^{1,2656}$.

A perda de solo se correlacionou com a potência do escoamento (coeficientes apresentados na Tabela 5.12) através da expressão: $PS = 0,0055.e^{15,57.(\gamma.Q.I_e)}$.

Tabela 5.12.- Resumo das correlações encontradas entre a perda de solo e os diferentes parâmetros hidráulicos testados, visando a separação das diferentes fases evolutivas do(s) sulco(s) de erosão.

Parâmetro	Expressão*	n	a	b	R^2
Tensão de cisalhamento	$y = a.e^{b.x}$	11	0,0103	0,5775	0,8844
Potência do escoamento	$y = a.e^{b.x}$	11	0,0055	15,57	0,7612
Número de Reynolds	$y = a.e^{b.x}$	11	0,0288	0,0013	0,7186
Potência segundo Bagnold	$y = a.e^{b.x}$	11	0,0404	1,1854	0,6349

* onde: x representa o parâmetro em estudo e y a perda de solo.

Na Figura 5.23. é apresentada a correlação obtida entre a perda de solo, que ocorreu em cada um dos ensaios antes da presença da fase final (sulco definido), e a tensão de cisalhamento do fluxo. A perda de solo apresentada na Figura 5.23. é expressa em função da largura do sulco de erosão (avaliada nos 15 minutos finais do ensaio) e do tempo de duração do ensaio.

Na literatura podem ser encontrados diversos trabalhos que apresentam a potência do escoamento como sendo um parâmetro eficiente para descrever o comportamento da perda de solo, tais como: Aziz e Scott (1989), Govers e Rauws (1986), Elliot (1988), Rose (1988), Govers *et al.*, (1990), Hairsine e Rose (1992a.b) e Nearing *et al.* (1997)). Elliot (1988) considera a potência do escoamento um parâmetro que deveria ser incorporado aos novos modelos que se propõem a estimar a desagregação do solo provocada pela ação do escoamento superficial.

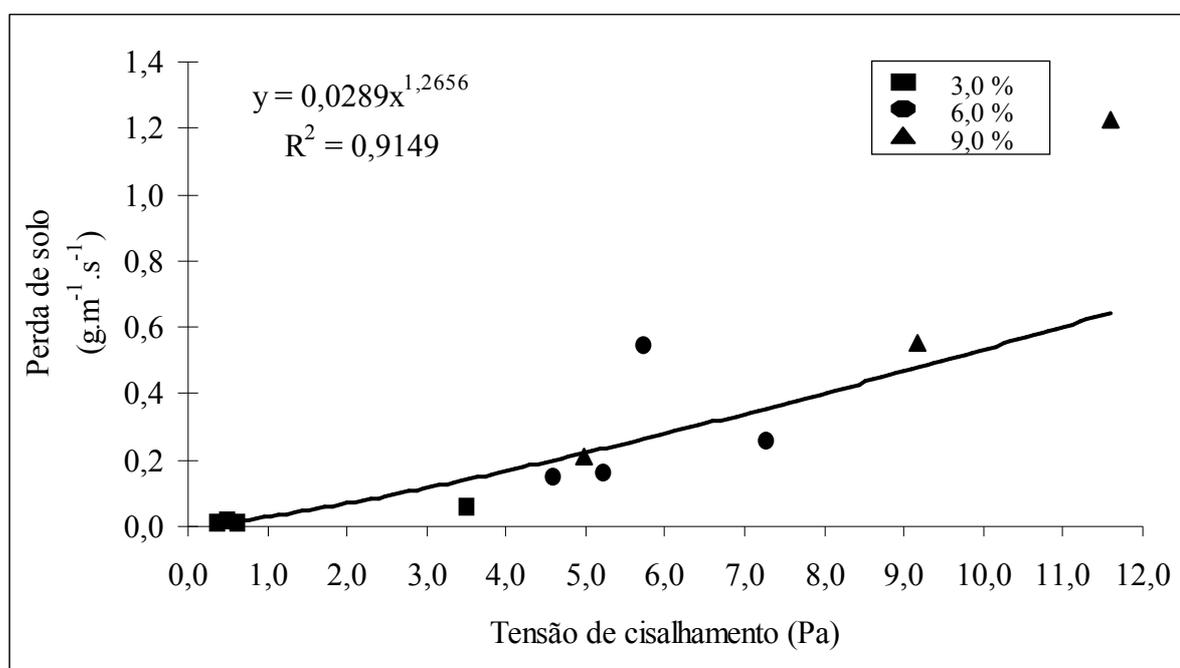


Figura 5.23.- Relação entre a tensão de cisalhamento do escoamento e a perda de solo, para cada um dos eventos simulados no canal experimental.

Entretanto, é necessário continuar realizando novos estudos para testar o comportamento deste parâmetro sob novas condições experimentais e, desta forma, definir a real importância deste indicador, uma vez que ainda existe uma certa controvérsia em relação à resposta positiva da potência do escoamento como um bom indicador para a desagregação do solo pela ação do fluxo. Por exemplo, Nearing *et al.* (1991), avaliando a desagregação do solo em condições de escoamento de lâmina rasa e com o canal experimental colocado em baixa declividade, concluiu que tanto a potência do escoamento (Ω) como a tensão de

cisalhamento (τ) não são bons estimadores para prever a desagregação das partículas do solo. No caso do estudo de Shainberg *et al.* (1994), a conclusão foi que os dois parâmetros citados responderam de forma positiva na estimativa da perda de solo, ou seja, os R^2 foram da ordem de 0,91 (τ) e de 0,94 (Ω).

5.3.2.- Dinâmica do processo de evolução dos sulcos

Um dos caminhos disponíveis para que se possa compreender a interrelação entre os processos que estão ocorrendo, simultaneamente, sobre o maciço de solo quando submetido à ação de um escoamento é identificar, entre os diferentes tipos de transporte sólido, qual deles que predomina em uma determinada fase do ensaio, bem como estabelecer a predominância de uma modalidade de transporte (via fundo e via suspensão) no transporte da carga de sedimentos que passou pela extremidade da cuba coletora (Cuba-I) e que chegou até o reservatório.

Além disso complementando estas informações, é interessante discutir e detalhar, para a condição de um evento onde o escoamento apresentou uma alta capacidade de desagregação e de transporte de partículas, quais foram as transformações ocorridas na superfície do maciço de solo e qual foi a resposta em termos de granulometria do material coletado nos potes no decorrer dos ensaios.

a.- Modalidades de transporte

Após verificar que a presença de pelo menos um sulco de erosão foi importante para provocar o aumento da tensão de cisalhamento e da potência do escoamento, por exemplo, uma questão que deverá ser analisada é o que estará ocorrendo no interior desse sulco recém formado e que vai passar pelas diferentes fases evolutivas. Um dos caminhos para se compreender como está ocorrendo essa evolução é saber qual a modalidade de transporte sólido está atuando quando o escoamento já está concentrado no sulco.

A identificação do tipo de transporte e qual ou quais modalidade(s) estaria(m) ocorrendo em cada uma das fases evolutivas do(s) sulco(s), foi realizada com base no critério proposto por Raudkivi (1990). Na Tabela 5.13. estão colocadas as informações necessárias para aplicar o critério de Raudkivi (1990) e o tipo de transporte sólido presente em cada ensaio.

Para as condições experimentais estudadas, foram encontrados predominantemente dois tipos de transporte de partículas, ou seja, as partículas e/ou os agregados foram transportados via suspensão, ou através da associação entre suspensão/saltação ou apenas saltação.

Tabela 5.13.- Descrição das informações necessárias para a aplicação do critério proposto por Raudkivi (1990) para identificar os diferentes tipos de transporte.

Decliv. (%)	Vazão (L.min ⁻¹)	Fase Evolutiva	Classe Textural ¹	w ² (m.s ⁻¹)	u* ³ (m.s ⁻¹)	W/u*	Tipo de Transporte
	10,0	S/ sulco	---	---	0,019	---	---
3,0	18,5	S/ sulco	AF	0,0283	0,025	1,1	Saltação
	25,5	S/ sulco	AM	0,0470	0,022	2,0	Saltação
	38,5	Incisão	AM	0,0470	0,059	0,8	Susp./Saltação
	51,0	C/ sulco	AG	0,0720	0,064	1,1	Saltação
6,0	10,0	S/ sulco	AF	0,0283	0,068	0,4	Suspensão
	18,5	S/ sulco	AMF	0,0109	0,072	0,2	Suspensão
	25,5	Incisão	AMF	0,0109	0,085	0,1	Suspensão
	38,5	C/ sulco	AM	0,0470	0,076	0,6	Susp./Saltação
	51,0	C/ sulco	AG	0,0720	0,109	0,6	Susp./Saltação
9,0	10,0	S/ sulco	AMF	0,0109	0,071	0,2	Suspensão
	18,5	Incisão	AF	0,0283	0,096	0,3	Suspensão
	25,5	C/ sulco	AM	0,0470	0,108	0,4	Suspensão
	38,5	C/ sulco	AG	0,0720	0,102	0,7	Susp./Saltação
	51,0	C/ sulco	AG	0,0720	0,122	0,6	Susp./Saltação

¹⁻ Classe textural do material transportado e coletado na Cuba-I, após a passagem de cada vazão, sendo: AMF areia muito fina, AF areia fina, AM areia média e AG areia grossa;

²⁻ w - Velocidade de queda das partículas transportadas pelo fluxo, os valores foram obtidos a partir dos dados levantados por Tarqui (2001) e Julien (1995);

³⁻ u* - Velocidade de cisalhamento.

O material de maior diâmetro que ficou retido na Cuba-I ou que foi coletado nos potes, chegou até lá via processo de saltação. Porém, é importante ressaltar que praticamente todos os valores que caíram na faixa de saltação foram iguais ao valor de 0,60 ou pouco superiores ao limite de separação dentre as duas modalidades de transporte, de acordo com o critério de Raudkivi (1990). Desta forma, estes valores, pouco superiores ao limite proposto, foram considerados como sendo uma associação entre os dois tipos de transporte sólido.

As partículas foram transportadas via suspensão durante a passagem das menores vazões em todas as declividades de trabalho, exceto quando da passagem dos 18,5 e dos 25,5L.min⁻¹ com o canal colocado na declividade de 3,0%. Nas situações simuladas, onde a energia do escoamento era pequena, em função da combinação entre a baixa declividade com as menores vazões, predominou o transporte via suspensão, especialmente de partículas da

fração areia muito fina e areia fina (Tabela 5.13.). É possível visualizar nas fotos obtidas após a passagem das três maiores vazões (Figura 5.24.), com o canal na declividade de 3,0%, através da mudança da característica da superfície do maciço, que as partículas sólidas transportadas aumentam de diâmetro conforme aumenta a vazão de alimentação, ocorre a incisão e o escoamento passa de difuso para concentrado.

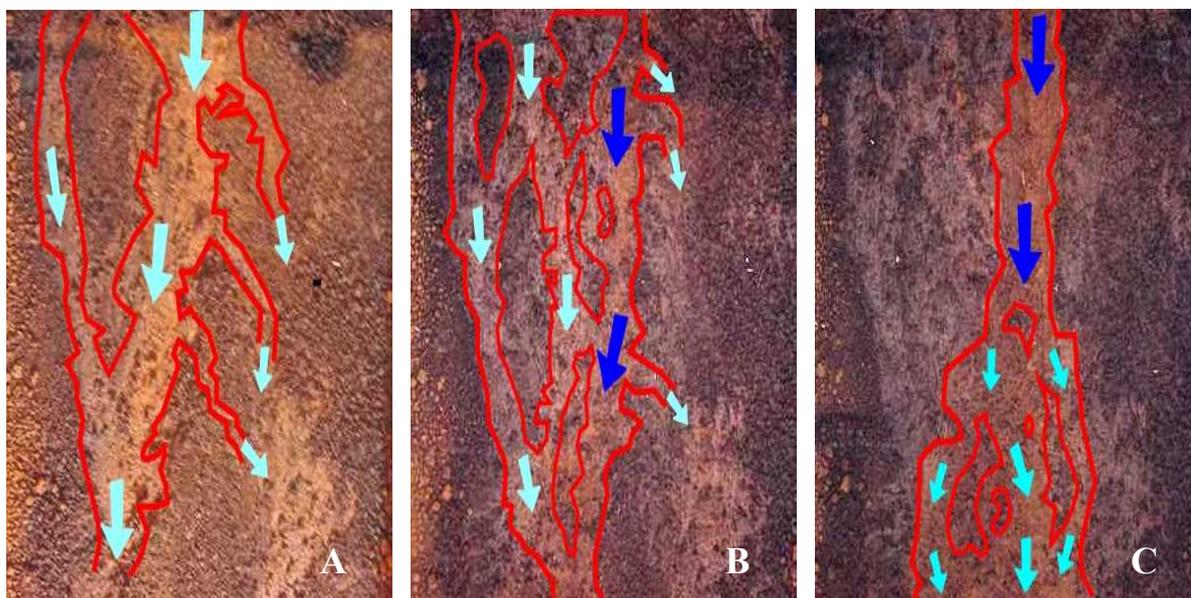


Figura 5.24.- Imagem obtida junto da seção 3 do canal, imediatamente após a passagem das vazões de 25,5 (A), 38,5 (B) e 51,0 L.min⁻¹ (C), com o canal colocado na declividade de 3,0%. Sendo que a tonalidade e o tamanho das setas indicam o caminho percorrido pelo fluxo de diferentes intensidades.

É possível perceber na imagem A da Figura 5.24. a presença de vários caminhos preferenciais e, neles, a passagem do escoamento superficial provoca o destacamento das partículas mais finas (fundo com coloração mais clara), entre estas partículas estão presentes as frações areia muito fina e areia fina (Tabela 5.13.) e o escoamento apresenta uma velocidade superficial igual ou inferior a 0,33m.s⁻¹ (Tabela 5.2). Portanto, estes resultados são respaldados pela proposição de Selby (1994), na qual é referido que 0,30m.s⁻¹ é a velocidade mínima para que ocorra o movimento da fração areia fina. Na parte superior da imagem, no lado esquerdo, observa-se a presença de uma “ilha” de material com maior diâmetro contornada pelo fluxo de menor intensidade.

Na segunda imagem (B), após a passagem de uma vazão 50,0% superior a anterior, o material de maior diâmetro começou a ser removido pelo fluxo e a superfície do maciço de solo muda, ou seja, aparece um caminho preferencial do escoamento já definido. Este caminho servirá de referência para o formato final do sulco gerado após a passagem da vazão de 51,0L.min⁻¹ (imagem C).

O primeiro evento realizado foi aquele de menor energia do escoamento superficial, ou seja, foi a interação entre a declividade de 3,0% e a vazão de $10,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, ensaio em que houve uma pequena quantidade material disponível para coleta na Cuba-I. Nesta condição, caso tenha ocorrido desagregação e transporte de partículas, o material mobilizado ficou retido sobre o próprio maciço de solo, apenas se deslocando de uma seção para a outra, como demonstram as suaves “ondulações” presentes nos dois primeiros gráficos da Figura 5.9. que mostram as alterações do fundo do canal durante a passagem de cada vazão.

Na declividade de 3,0%, a partir do momento em que a energia do escoamento superficial foi suficiente para vencer a resistência do solo que formava o maciço e pelo menos um sulco começou a se formar, o transporte das partículas desagregadas pelo escoamento tendeu a ser via associação suspensão/saltação. Na vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, nos 3,0%, é que o transporte sólido ocorreu predominantemente via saltação. Neste caso, cada partícula retirada da superfície do maciço ascende do fundo a uma altura poucas vezes superior ao seu próprio diâmetro, voltando a cair sobre a superfície do maciço a partir do momento em que a força que a sustenta for superada pelo seu próprio peso. Além disso, de acordo com Raudkivi (1990), a saltação está associada a focos de turbulência e as oscilações de pressão, os quais estão diretamente envolvidos com o destacamento das partículas junto ao fundo.

É importante ressaltar que, para a declividade de 3,0%, o critério proposto por Raudkivi (1990) não foi capaz de separar satisfatoriamente os diferentes tipos de transporte sólido como ocorreu nas maiores declividades. Entretanto, nos 6,0 e 9,0% antes da incisão predominou o transporte via suspensão e na fase de sulco definido e escoamento canalizado predominou a associação entre suspensão e saltação. A única exceção foi a vazão de $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, nos 9,0%, na qual mesmo após a incisão o critério de separação indicou suspensão.

A maioria das partículas foi transportada via suspensão, ou seja, as partículas são destacadas do fundo pela turbulência do fluxo e mantidas em suspensão pelo balanço entre a força peso da partícula e a quantidade de movimento transmitida a ela pelos vórtices (NEARING e PARKER, 1994; LEEDER, 1999). Na tentativa de avaliar com maior detalhe as características das partículas que estavam em suspensão na massa líquida, se buscou uma forma de separar tais partículas em pelo menos dois grupos, a partir do critério (Fator R) proposto por Nezu e Nakagawa (1993).

Na Tabela 5.14., estão colocados os valores encontrados para o Fator R, para cada uma das declividades e das vazões. As partículas mais leves (Grupo 1) são aquelas em o Fator $R \leq 1,0$, ou seja, com menor peso e portanto, se deslocam quase que única e exclusivamente em

suspensão, por uma distância maior sobre a superfície do maciço. Além disso, ultrapassam o limite da última seção e da Cuba-I, seguindo junto com o fluxo para o reservatório.

As partículas do Grupo 2, são aquelas com maior peso e com Fator R > 1,0. Portanto, quando são arrancadas da superfície do maciço de solo transitariam em suspensão, por um determinado período de tempo (curta duração), e novamente irão cair sobre o maciço. Em função da sua queda, essas partículas, de maior tamanho que as do Grupo 1, podem mobilizar e/ou remobilizar outras partículas existentes sobre a superfície. Portanto, poderão fazer com que ocorra um aumento na perturbação junto ao fundo. Esta perturbação ocorre em função da presença dessa massa de partículas sólidas, em um movimento caótico, que estão chocando-se entre si constantemente (LEEDER, 1999).

Tabela 5.14.- Fases evolutivas dos sulcos de erosão associadas ao tipo de transporte de sedimentos e ao tipo de partícula que está sendo transportada em cada condição, para cada declividade do canal e vazão aplicada.

Declividade (%)	Vazão (L.min ⁻¹)	Fase Evolutiva	W/u ^{*1}	Tipo de Transporte ²	Fator R	Tipo de Partícula
	10,0	Sem sulco	---	---	---	---
	18,5	Sem sulco	1,1	Susp./Saltação	2,8	Pesada
3,0	25,5	Sem sulco	2,1	Saltação	5,2	Pesada
	38,5	Incisão	0,8	Susp./Saltação	1,9	Pesada
	51,0	Com sulco	1,1	Saltação	2,7	Pesada
	10,0	Sem sulco	0,4	Suspensão	1,0	Pesada
	18,5	Sem sulco	0,2	Suspensão	0,4	Leve
6,0	25,5	Incisão	0,1	Suspensão	0,3	Leve
	38,5	Com sulco	0,6	Susp./Saltação	1,5	Pesada
	51,0	Com sulco	0,6	Susp./Saltação	1,6	Pesada
	10,0	Sem sulco	0,2	Suspensão	0,4	Leve
	18,5	Incisão	0,3	Suspensão	0,7	Leve
9,0	25,5	Com sulco	0,4	Suspensão	1,1	Pesada
	38,5	Com sulco	0,7	Susp./Saltação	1,1	Pesada
	51,0	Com sulco	0,6	Susp./Saltação	1,4	Pesada

¹- w - Velocidade de queda das partículas, os valores foram obtidos a partir de Tarqui (2001), que trabalhou com um solo que apresentava 74,0% de argila e de Julien (1995);

²- Diferenciação realizada através do critério proposto por Raudkiwi (1990).

Os valores do Fator R, apresentados na Tabela 5.14., confirmam a mesma tendência de comportamento encontrada quando foi discutido o tipo de transporte de partículas (Tabela 5.13.), exceto para as vazões de $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ nos 3,0% e nos $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ nos 9,0%. A evolução dos valores do Fator R indica que, após a incisão e com sulco de erosão definido as partículas que são transportadas são as mais pesadas. Nos 3,0%, o critério proposto por Nezu e Nakagawa (1993), como já havia ocorrido com o critério de Raudkivi (1990,) não foi eficiente para separar os dois grupos de partículas, talvez, como já foi referido, em função da baixa energia e da menor capacidade de desagregação do escoamento superficial. Nesta menor declividade, o critério de separação das partículas só funcionou para as vazões máximas.

Os estudos conduzidos por Vanoni e Nomicos (1960) e Mendoza e Zhou (1995) demonstraram que a presença de partículas sólidas em suspensão no fluxo é capaz de reduzir a intensidade turbulenta do escoamento e, por conseqüência, a quantidade de sedimento transportado via suspensão, uma vez que, esta modalidade de transporte sólido é dependente desta intensidade. Essas partículas que estavam em suspensão podem então voltar para a superfície do maciço de solo depois de alguns instantes e com isso aumentar ainda mais o processo de destacamento de partículas sólidas. Entretanto, no caso das vazões baixas neste estudo, $18,5$ e $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, exceto 3,0%, onde predomina o transporte via suspensão e com as partículas leves em transporte ($\text{Fator R} \leq 1,0$), esse retorno das partículas que estavam em suspensão à superfície do maciço seja menos freqüente e o destacamento de partículas menor do que nas vazões mais altas.

É importante esclarecer que, as baixas vazões foram aplicadas pouco tempo depois da colocação do solo no canal experimental e do nivelamento da superfície do maciço e, logo em seguida, aplicação de uma chuva simulada de $60,0\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$. A aparência da superfície do maciço de solo, antes da chuva simulada, estava semelhante à camada superficial (0,0-0,20m) de uma lavoura submetida ao preparo convencional (solo revolvido e pulverizado). Desta forma, provavelmente, estavam prontamente disponíveis na superfície do maciço de solo, por ocasião da passagem das vazões baixas, uma grande quantidade de partículas com pequeno diâmetro praticamente soltas sobre a superfície.

No caso da declividade de 3,0%, a interação entre a forma de transporte e o tipo de partícula transportada não apresentou o mesmo comportamento ocorrido nas duas declividades maiores. Por ocasião da passagem da vazão de $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, o transporte predominante foi suspensão e as partículas transportadas apresentaram o $\text{Fator R} \geq 1,0$. Na passagem da vazão de $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, o tipo de transporte foi a saltação e predominaram no

fluxo aquelas partículas mais pesadas; porém, ainda não havia ocorrido a incisão de nenhum sulco de erosão.

Na menor declividade, esta mudança de tendência pode ter ocorrido em função de que, com a passagem das duas primeiras vazões, foram deslocadas e transportadas a maioria das partículas de menor diâmetro. A partir do momento em que a vazão foi aumentada em 2,5 vezes em relação a vazão inicial, começaram a ser transportadas partículas de diâmetro um pouco maior (Tabela 5.7.) removidos via saltação. Entretanto, aquelas partículas de menor diâmetro que ainda permaneceram na superfície do maciço foram transportadas via suspensão/saltação ($38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) e saltação ($51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) e sendo consideradas como partículas pesadas, segundo o critério apresentado por Nezu e Nakagawa (1993).

Para complementar as informações relativas às modalidades de transporte é importante associar à análise alguns parâmetros hidráulicos. Por ocasião da incisão nos 3,0%, durante a passagem das vazões de $18,5$ e $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, tanto os valores da potência do escoamento, como da tensão e da velocidade de cisalhamento foram pelo menos 40,0% menores do que os valores necessários para a incisão: $0,22\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$; $3,50\text{Pa}$ e $0,059\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente.

Portanto, a capacidade desagregadora do escoamento, durante este período, permitiu que fossem desagregadas e transportadas apenas partículas de menor peso e diâmetro. Por exemplo, o d_{50} das partículas do material coletado na Cuba-I após a passagem dos $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ foi de $0,14\text{mm}$. Desta forma, no 3,0%, as partículas de maior tamanho foram transportadas quando a vazão de alimentação foi de ($51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) e, os parâmetros hidráulicos subiram para $0,31\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$; $4,09\text{Pa}$ e $0,064\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Com a elevação da energia do escoamento, o d_{50} das partículas desagregadas e transportadas passou para $0,59\text{mm}$ após a passagem dos $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Os critérios propostos por Raudkivi (1990) e por Nezu e Nakagawa (1993) funcionaram razoavelmente bem para os 6,0 e para os 9,0%. No caso dos 3,0%, os resultados obtidos foram contraditórios. Na declividade de 6,0%, exceto para os $10,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ predominou o transporte via suspensão onde estavam em movimento partículas mais leves. A passagem da vazão de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ desagregou as partículas mais pesadas que foram transportadas predominantemente via associação entre suspensão e saltação.

Na declividade de 9,0%, quando da passagem da vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, em uma condição de sulco já definido e escoamento canalizado, predominou o transporte via associação entre suspensão e saltação, com a presença de partículas sólidas de maior peso. Durante a passagem dos $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, embora o tipo de transporte sólido indicado pelo critério de separação fosse suspensão as partículas que estavam em movimento eram pesadas, segundo o critério de Nezu e Nakagawa (1993). Durante a passagem dos $10,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ as partículas em transporte eram leves e foram transportadas via suspensão.

b. Contribuição relativa do material transportado via fundo e via suspensão

A seqüência das diferentes fases evolutivas dos sulcos, descritas para cada seqüência de vazões crescentes e sucessivas, foi praticamente a mesma, como foi descrito no item 5.5.1.. Apenas quando o canal experimental, estava colocado na declividade de 3,0%, é que a fase de aprofundamento não esteve presente.

Este tipo de comportamento indica, por exemplo, que com o aumento da potência do escoamento superficial, não muda a seqüência das fases evolutivas; porém, este aumento na energia do fluxo influencia diretamente na magnitude com que cada um dos processos de desagregação, transporte e deposição irão ocorrer na superfície do maciço de solo ou já no interior do sulco, na condição de escoamento superficial já canalizado. O aumento na produção de sedimentos em cada uma dessas fases evolutivas, se refletirá diretamente no comportamento da perda de solo que está sendo quantificada na extremidade da Cuba-I do canal experimental.

A quantidade de material que está sendo desagregada pela passagem do escoamento poderá avançar pela superfície do maciço de solo e seguir adiante diretamente para a Cuba coletora ou então seguir em frente para o reservatório. O transporte das partículas desagregadas pode ser tanto via fundo como via suspensão. Na tentativa de comparar qual é a contribuição de cada um desses tipos de transporte, foi calculado o percentual de participação de cada um deles, antes e depois da fase de incisão de pelo menos um sulco de erosão, os resultados estão apresentado na Tabela 5.15.

Tabela 5.15.- Percentual de participação dos tipos de transporte (via suspensão e via fundo), no material total transportado pelo escoamento, após a aplicação de vazões crescentes, com o canal posicionado nas declividades de 3,0; 6,0 e 9,0%.

Declividade (%)	Perda de solo total (g)	Antes da incisão		Após a incisão	
		Suspensão (%)	Fundo (%)	Suspensão (%)	Fundo (%)
3,0	1.492,40	75,0	25,0	44,0	56,0
6,0	4.4107,22	80,0	20,0	26,0	74,0
9,0	63.577,06	68,0	32,0	17,0	83,0
Média	-----	74,0	26,0	29,0	71,0

O cálculo, que indica qual é a participação de cada tipo de transporte, foi realizado considerando que o material transportado via fundo é aquele que ficou retido na Cuba-I. Este material é aquele que, de acordo com o critério de Raudkivi (1990), foi transportado por saltação ou então pela associação entre suspensão/saltação. O material transportado via fundo

é constituído por partículas com maior peso, ou seja, com Fator $R > 1,0$, de acordo com o critério de Nezu e Nakagawa (1993). Portanto, trata-se das partículas de maior tamanho ou mesmo de agregados. A contribuição do transporte via suspensão é considerada aqui, como sendo todo aquele material que passou pela Cuba-I e seguiu adiante sendo coletado antes de voltar para o reservatório, composto por partículas de pequeno diâmetro (finos).

Após a observação dos dados médios para cada uma das situações, apresentados na Tabela 5.15., fica evidente que após a incisão de pelo menos um sulco ocorre a inversão entre os dois tipos de transporte. Antes da incisão de pelo menos um sulco, a contribuição do transporte via suspensão para o total de material transportado foi da ordem de 74,0%.

Entretanto, logo depois, quando começam os processos de erosão regressiva, erosão do fundo do sulco, solapamento das margens e a incorporação desse material ao escoamento superficial a tendência se altera, ou seja, quem passa contribuir com 71,0% é o transporte via fundo, especialmente, através do transporte das partículas por saltação ou suspensão, como ficou demonstrado na discussão apresentada no item 5.5.3.-a.

Em geral, observando a Tabela 5.15., verifica-se que existe uma inversão na contribuição de cada uma das cargas que constituem o transporte sólido (finos e grossos) ao total de material perdido pelo maciço de solo. Tal inversão ocorre após a incisão de um sulco, a contribuição média da suspensão que era de 74,0% (antes da incisão) caiu para apenas 29,0% e a contribuição médio do transporte via do fundo subiu dos 26,0% para os 71,0%.

Na Figura 5.25., está apresentada a contribuição percentual de cada um dos tipos de transporte à carga total, para as três declividades. No primeiro gráfico da Figura 5.25. estão apresentados os dados obtidos para a declividade de 3,0%, no qual é possível perceber que o cruzamento entre as curvas, que representam o transporte via suspensão e o transporte via fundo, só ocorreu, praticamente, no final da seqüência das cinco vazões aplicadas sobre a superfície do solo. Este comportamento é resultado da baixa capacidade do escoamento superficial para desagregar e transportar as partículas que formam o maciço. Na passagem das menores vazões, foram removidas apenas as partículas de menor diâmetro.

Nos $18,5\text{L.min}^{-1}$, o d_{50} das partículas coletadas na Cuba-I foi de 0,145mm (Tabela 5.7.). Foi apenas depois da passagem da fase de escoamento difuso para concentrado (incisão de sulco), ocorrida após a metade do evento, onde foram aplicados os $38,5\text{L.min}^{-1}$, que as curvas tenderam a se aproximar. A inversão, entre os tipos de transporte via suspensão e via fundo, só foi confirmada por ocasião da passagem da vazão de $51,0\text{L.min}^{-1}$, a partir do momento em que o sulco de erosão, visualizado nas Figuras 5.1.7. e 5.1.10, chegou na fase de sulco definido. Neste momento, a velocidade do escoamento superficial oscilava pouco (Figura 5.1. e Anexo I) e tanto as bordas como a profundidade do sulco já estavam

estabilizadas; além do que a quantidade de material que era transportado para a Cuba-I se mantinha constante.

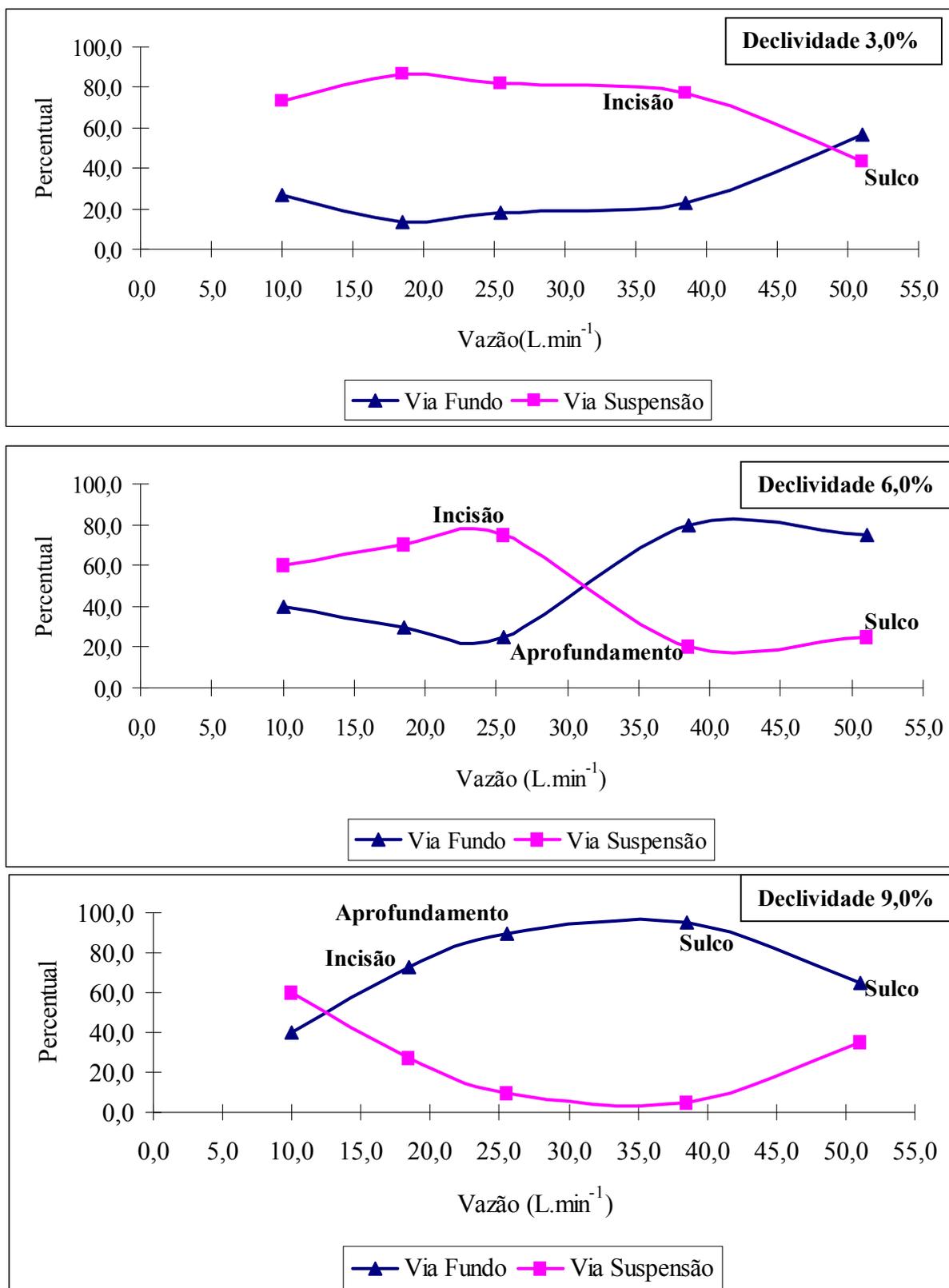


Figura 5.25.- Evolução da participação do transporte via suspensão e via fundo no total de material transportado pelo escoamento superficial para os eventos simulados nas três declividades.

Assim, há indícios claros para se supor que, nos 3,0%, já havia sido atingida a capacidade do escoamento de desagregar e de transportar as partículas. A comprovação deste fato é possível observando o último gráfico da Figura 5.14., onde é detalhada a concentração de sedimentos no escoamento. Neste gráfico, é possível perceber que a concentração está estabilizada, em torno de $0,16\text{g.L}^{-1}$, quando dos minutos finais da passagem dos $51,0\text{L.min}^{-1}$. A ação das vazões aplicadas sobre o maciço na declividade de 3,0% resultou em um sulco de tamanho reduzido, como foi discutido no tópico 5.1.4. e a perda total de solo chegou a 1,49kg (Tabela 5.15).

Avaliando, o segundo gráfico colocado na Figura 5.25. que representa a declividade de 6,0%, é possível constatar que o ponto de inversão entre as contribuições do transporte via suspensão e via fundo foi antecipado em relação aos 3,0%. Com o canal colocado na declividade de 6,0%, a inversão ocorreu durante a passagem da vazão de $38,5\text{L.min}^{-1}$, momento esse em que já havia ocorrido a incisão e a evolução de pelo menos um sulco de erosão na superfície do maciço. O processo de incisão já havia ocorrido, nos primeiros 20 minutos do evento anterior, quando passou a vazão de $25,5\text{L.min}^{-1}$.

Na declividade de 6,0%, foram criadas condições que proporcionaram um aumento na capacidade do escoamento em desagregar e transportar partículas de solo. Desta forma, o fluxo foi capaz de desagregar e de transportar o material mobilizado. O d_{50} do material transportado e que chegou a Cuba-I, antes da inversão, foi da ordem de 0,113mm e, depois que começou a predominar o transporte via fundo, o d_{50} das partículas transportadas subiu para 0,540mm.

Além disso, como na declividade de 6,0%, o processo de incisão ocorreu entre os 15 e os 20 minutos iniciais do ensaio com a vazão de $25,5\text{L.min}^{-1}$ (Tabela 5.3.). Desta forma, é de se esperar que a inversão entre os dois tipos de transporte possa ter ocorrido por volta da metade do ensaio de $38,5\text{L.min}^{-1}$. Portanto, o escoamento superficial estando animado com maior energia e com mais tempo para mobilizar e transportar partículas sólidas na superfície do maciço, do que tinha na declividade de 3,0%, fez com que a da perda total de solo estimada, após a passagem das cinco vazões subisse para 44,11kg (Tabela 5.15)..

Este valor, praticamente, quadruplicou em relação a perda total de solo estimada para a declividade anterior. Este tipo de comportamento se deve, em tese, ao fato do fluxo com mais energia e já canalizado dispor de pelo menos 90 minutos (30 minutos na passagem da vazão de $38,5\text{L.min}^{-1}$ e 60 minutos na passagem da vazão de $51,0\text{L.min}^{-1}$) a mais, em relação aos 3,0%, para remover o material oriundo tanto do fundo como das paredes dos sulcos. Uma vez que, nesses 90 minutos estavam ocorrendo as fases de aprofundamento e alargamento desses sulcos.

Na declividade de 6,0%, a contribuição em termos percentuais, após a inversão entre os dois tipos de transporte, foi muito semelhante. A comprovação desta tendência pode ser feita através da observação dos dados apresentados na Tabela 5.15. A relação entre os dois tipos de transporte antes da inversão, indicava que o transporte via suspensão contribuía quatro vezes mais que o transporte de fundo, para o transporte total de partículas sólidas. Entretanto, depois da incisão de pelo menos um sulco, esta mesma relação passou a indicar que a participação do transporte via suspensão era de apenas 1/3 no transporte total.

A observação do gráfico representativo da declividade de 9,0%, na Figura 5.25., permite verificar que a condição de participação do transporte via fundo foi expressiva, com uma participação que alcançou 83,0 % (Tabela 5.15.). Nesta condição de máxima energia do escoamento, porém com a presença de escoamento sub-superficial nas duas menores vazões, o d_{50} médio das partículas que chegam até a Cuba-I, antes da inversão entre os dois tipos de transporte sólido, foi de 0,150mm (Tabela 5.7.).

Depois que o transporte via fundo começou a predominar, o d_{50} médio das partículas coletadas na Cuba-I subiu para 0,47mm (Tabela 5.7.). Além de transportar partículas de maior diâmetro, o transporte via fundo contribui com um volume maior de partículas. Pois, é no final da passagem da vazão de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, que este tipo de transporte atinge um percentual de contribuição de 95,0%, no momento exato em que está ocorrendo a fase de aprofundamento dos sulcos formados e com a ocorrência do processo de erosão regressiva.

Observando-se o comportamento das duas curvas após a passagem dos $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ e durante a passagem da vazão máxima, com o canal colocado na declividade de 9,0%, (Figura 5.25.) é possível perceber que existe a tendência de aproximação entre as curvas e que, caso fosse possível, avançar com o evento ocorreria uma nova inversão na contribuição dos dois tipos de transporte. Uma vez que, nessa situação hipotética, seria atingida a capacidade do escoamento desagregar e transportar partículas de solo. Portanto, seria atingido um novo estado de equilíbrio onde haveria a estabilização do processo erosivo e uma, conseqüente, redução na geração de sedimento na superfície do maciço, na qual os sedimentos gerados seriam de menor diâmetro.

O resultado final do processo de incisão e evolução dos sulcos em solo de textura argilosa formando um maciço no interior do canal colocado na declividade de 9,0%, foi a geração de dois sulcos de erosão, os quais foram discutidos em detalhe anteriormente e apresentados em planta na Figura 5.8.. A seqüência de vazões provocou uma desagregação capaz de produzir uma perda total de solo, aproximadamente, 45,0% superior àquela ocorrida quando o canal experimental estava colocado na declividade de 6,0%, alcançando 63,58kg (Tabela 5.15).

c.- Evolução espaço-temporal do(s) sulco(s)

Embora se tenha buscado agrupar o material coletado nos potes, na extremidade da Cuba-I, de acordo com a fase evolutiva do(s) sulco(s) em desenvolvimento e associar a granulometria desse material com as descrições qualitativas dos processos de erosão/deposição ocorridos na superfície do maciço de solo, não foi possível realizar esse procedimento para todos os eventos.

O trabalho associação das informações se mostrou promissor apenas para aquelas vazões que passaram sobre o maciço de solo após a incisão de pelo menos um sulco de erosão e entre essas o melhor resultado foi encontrado quando da passagem da vazão máxima com o canal experimental colocado na declividade de 6,0%.

Portanto, neste tópico será discutida a evolução espaço-temporal do(s) sulco(s) de erosão em um evento onde o escoamento superficial apresentava de alta energia e os impactos provocados no diâmetro médio das partículas sólidas desagregadas e transportadas pelo fluxo e que se dirigiam para o reservatório.

Para exemplificar o raciocínio que norteou o estabelecimento dos critérios para a identificação das fases evolutivas dos sulcos de erosão, segue a descrição realizada durante a passagem da vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ e declividade de 6,0%. Logo em seguida, na Figura 5.26., será descrito o comportamento do d_{50} das partículas desagregadas e transportadas pelo escoamento superficial que passaram pela Cuba-I e seguiram pelo bico do canal, por ocasião da passagem da vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal colocado na declividade de 6,0%. As seções (S_1, S_2, S_3 e S_4), colocadas para indicar a posição aproximada sobre o maciço de solo, são aquelas descritas anteriormente na Figura 4.2..

Após a documentação da passagem da vazão de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, limpeza da Cuba-I, ajuste da vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ e fixação da declividade de 6,0%, foi dado início ao evento correspondente a vazão máxima desta declividade. A evolução espaço-temporal dos processos na superfície do maciço de solo, foi a seguinte:

- 00–05 min:** Os caminhos preferenciais laterais, que se desenvolveram durante a passagem da vazão anterior de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, sendo o primeiro deles próximo da borda direita do canal (sulco menor) e o segundo próximo da borda esquerda do canal (sulco maior) se mantiveram e logo depois, aumentaram tanto em termos de largura como de comprimento, ou seja, este era o caminho preferencial do escoamento. Desta forma, na parte central do canal passava um pequeno volume de água;
- 05–10 min:** O processo de erosão regressiva se estabelece provocando redução na largura e aumento progressivo da profundidade dos sulcos, especialmente, daquele situado próximo da borda lateral esquerda do canal mais nitidamente nas seções S_2 e S_3 ;

- 10–15 min:** Em função da presença do processo de erosão regressiva, o sulco posicionado próximo da borda lateral esquerda do canal já retrocedeu para a S_1 estando localizado a aproximadamente 0,50m da entrada de água do canal experimental;
- 15–20 min:** O sulco posicionado próximo da borda lateral esquerda do canal já se localiza a 0,25 m da entrada de água do canal, ou seja, na metade da S_1 . Nas seções S_1 e S_2 , a largura do sulco está próxima de 0,20m;
- 20–25 min:** O sulco posicionado próximo da borda lateral esquerda do canal alcança a entrada de água do canal. A partir deste momento por ele passa em torno de 60,0% da água que escoava sobre o maciço de solo colocado no canal;
- 25–30 min:** O sulco próximo da borda lateral esquerda do canal ocupa agora a maior parte da largura do canal algo em torno de 0,45m, sendo que o sulco apresenta as seguintes dimensões 0,17m de largura e 0,09m de profundidade e 2,20m de comprimento, ou seja, avança pelas seções S_1 , S_2 , S_3 e S_4 ;
- 30–35 min:** O sulco localizado junto a borda lateral direita do canal deixa de receber água;
- 35–45 min:** Apenas o sulco localizado na borda lateral esquerda do canal recebe água a partir de agora; portanto, o escoamento neste sulco está avançando pelas seções S_1 , S_2 , S_3 e S_4 , sendo que na seção S_4 é possível observar os primeiros sinais de que o processo de deposição já começa a ocorrer;
- 45–60 min:** O escoamento se mostra com maior velocidade nas Seções S_1 e S_2 . Entretanto, nas seções S_3 e S_4 existe visível deposição do material de granulometria mais grossa e intermediária. Desta forma, é possível dizer que a fase de desagregação mais intensa já foi superada, uma vez que ela ocorreu do minuto 15 até o 35.

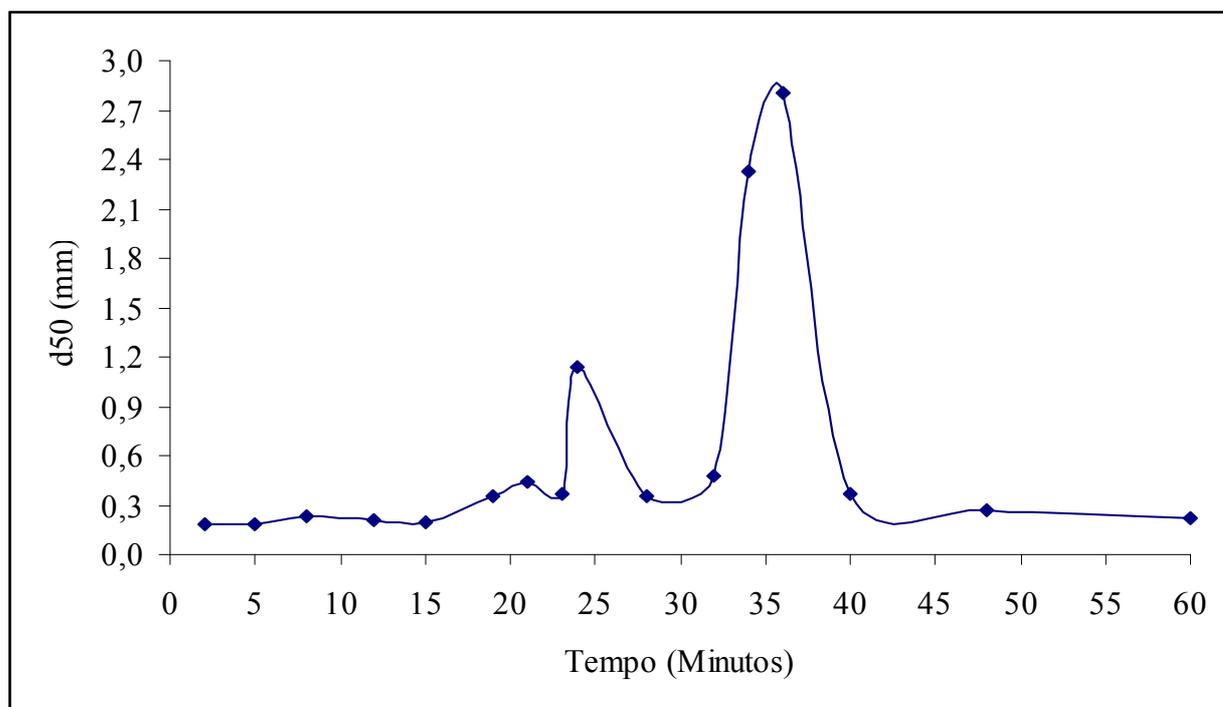


Figura 5.26.- Comportamento do diâmetro médio das partículas transportadas pelo escoamento superficial quando da passagem da vazão de $51,0L.min^{-1}$, com o canal colocado na declividade de 6,0%.

Na análise da Figura 5.26., se percebe que até os 10 primeiros minutos de ensaio o d_{50} das partículas não se altera e gira em torno de 0,20mm. As mudanças no diâmetro médio das partículas transportadas começam a ser percebidas, a partir do minuto 23, quando a maior parte do escoamento superficial já estava concentrada no sulco de erosão localizado próximo da borda esquerda do canal.

A presença do processo de erosão regressiva provocou o revolvimento do fundo, o solapamento das laterais e a queda das paredes, além do alargamento do sulco em formação. O resultado final dessa associação de processos pode ser observado na imagem da superfície do maciço construído no programa computacional Surfer®, após a passagem da vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, apresentada na Figura 5.7..

O primeiro pico (menor), com partículas de 1,14mm, ocorre devido à chegada, via erosão regressiva, do sulco localizado junto da borda lateral esquerda do canal ao ponto de entrada de água e, com isso, ele passa a receber mais de 60,0% da água que entra no canal. O segundo e maior pico, com partículas de 2,8mm, ocorre porque, entre os minutos 35 e 40, deixa de passar água no sulco localizado junto da borda lateral direita do canal. Portanto, a totalidade da água que alimenta o canal circula pelo sulco localizado na borda lateral esquerda do canal. Logo, depois do minuto 45, começa a deposição das partículas sólidas e tem início o processo de estabilização do fundo do sulco. O d_{50} volta a assumir valores semelhantes àqueles do início do evento, ou seja, 0,25mm.

A descrição dos processos que ocorreram na superfície do maciço de solo, quando o escoamento apresentava alta energia, demonstrou que os diferentes níveis de observação possíveis através do uso da estrutura experimental construída se complementam e permitem que se avance no entendimento da evolução do processo erosivo. Uma vez que, foi possível separar as diferentes fases que compõem o processo de formação dos sulcos, em solo de textura argilosa, associando as informações obtidas através da percepção visual durante os eventos, dos parâmetros hidráulicos levantados, do estudo comparativo entre superfícies geradas no programa computacional Surfer® e da quantificação do material que foi desagregado e transportado durante cada ensaio.

5.3.4.- Síntese da evolução

No momento em que foram discutidos quais seriam os parâmetros hidráulicos capazes separar as diferentes fases de formação de um sulco de erosão ficou claro que alguns dos parâmetros hidráulicos avaliados responderam satisfatoriamente à elevação da vazão de

alimentação e às mudanças na declividade do canal experimental. Entretanto, a relação entre estes mesmos parâmetros hidráulicos com a perda de solo não foi direta.

A potência do escoamento foi o parâmetro hidráulico que, de acordo com os critérios estabelecidos neste estudo, respondeu de uma forma satisfatória e eficiente às mudanças ocorridas na superfície do maciço de solo e na perda total de solo. Conforme aumentou a vazão de alimentação do canal e a sua declividade subiu de 3,0% para 9,0%. Na Tabela 5.16., apresentada logo a seguir, estão colocadas a amplitude das diferentes faixas de variação dos valores de potência do escoamento, para cada uma das etapas de formação dos sulcos de erosão descritas no item 5.5.1..

As faixas de variação para cada uma das etapas evolutivas dos sulcos, nas condições do presente estudo, foram: até $0,20\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$, não havia a presença de sulcos (escoamento superficial distribuído quase que na totalidade da largura do canal experimental); a incisão e o aprofundamento e/ou alargamento dos sulcos, ocorreu até o instante em que a potência do escoamento atingiu o valor de, aproximadamente, $0,28\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$. O valor máximo da potência do escoamento atingido foi da ordem de $0,54\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$, com o canal experimental colocado na declividade de 9,0% e durante a passagem da vazão de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, ou seja, a partir do momento em que o(s) sulco(s) de erosão já estavam plenamente desenvolvidos sobre a superfície do maciço de solo.

Tabela 5.16.- Valores de potência do escoamento calculados para as diferentes faixas de evolução dos sulcos de erosão, em função das vazões crescentes e sucessivas aplicadas e da elevação da declividade do canal experimental.

Potência do Escoamento	Sem sulco		Zona de Transição		Com sulco	
	de	Até	de	Até	de	Até
$\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$	0,0571	0,1978	0,2201	0,2797	0,3136	0,5440

A resposta obtida foi muito boa, uma vez que foi possível determinar as faixas de amplitude de cada uma das diferentes fases evolutivas dos sulcos de erosão, tomando como referência o comportamento da potência do escoamento. No trabalho conduzido por Nearing *et al.* (1997) para estudar tanto a hidráulica do escoamento como o processo de erosão em sulcos, uma das conclusões dos autores é que a potência do escoamento demonstrou ser um parâmetro consistente e apropriado para predição da carga de sedimentos em todo o conjunto de dados avaliados.

Como forma de mostrar a síntese da relação que foi estabelecida entre a potência do escoamento, calculada através da expressão [3.19] e a perda total de solo, em cada uma das três fases evolutivas principais dos sulcos de erosão foi construída a Figura 5.27..

No gráfico apresentado é possível perceber a sucessão de fases, ou seja, primeiramente temos um grupo de pontos que indica a ausência dos sulcos de erosão, logo depois aparecem aqueles pontos que representam a fase de incisão de pelo menos um sulco de erosão na superfície do solo e na parte final da curva estão colocados os pontos que indicam a etapa onde os sulcos já estão se aprofundando e definido tanto bordas como fundo; portanto, mais estreitos e mais profundos.

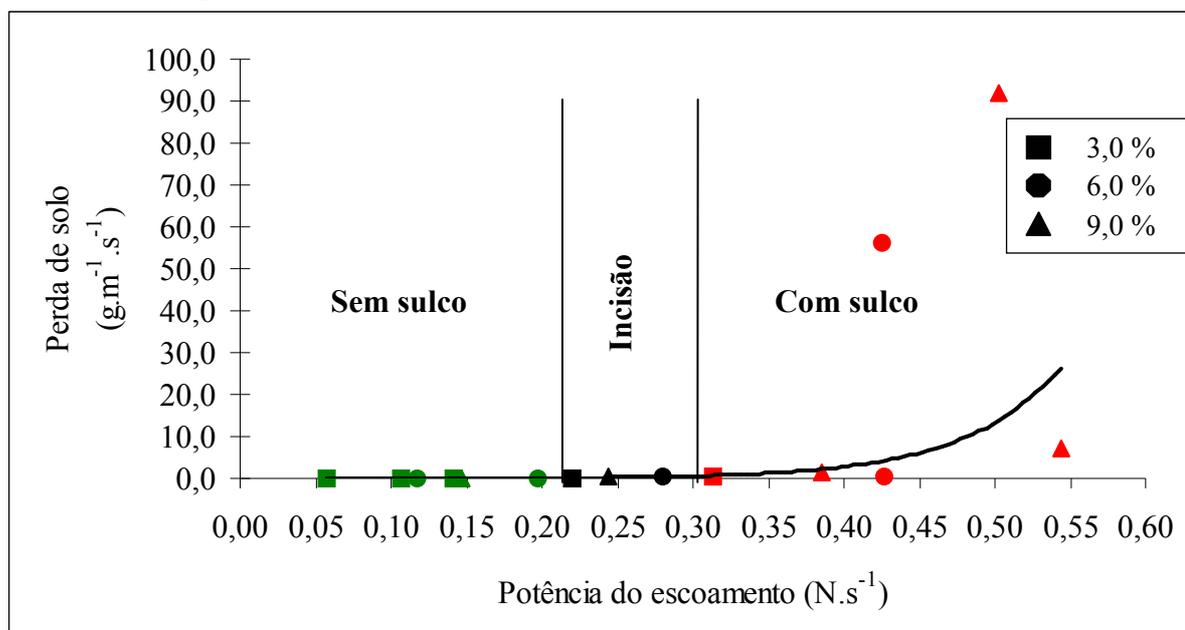


Figura 5.27.- Síntese das faixas de evolução dos sulcos de erosão, a partir da relação entre a potência do escoamento e a perda de solo, para cada um dos eventos simulados no canal experimental.

Na Figura 5.28., são apresentadas as imagens reais que foram documentadas logo depois da passagem de cada uma das cinco vazões crescentes e sucessivas, com o canal colocado nas três declividades de trabalho. Além disso, estão associadas às fotos do canal experimental, ao final dos eventos, uma ilustração com os respectivos potes plásticos onde o material desagregado e transportado pelo fluxo que foi coletado, em diferentes intervalos de tempo, antes de seguir para o reservatório. É importante ressaltar que os potes foram agitados antes de cada uma das fotos. As imagens ilustram o efeito da passagem, das vazões de $10,0\text{L.min}^{-1}$ (Foto 1-A) e $25,5\text{L.min}^{-1}$ (Foto 2-B) com o canal colocado na declividade de 3,0%. Na Foto 3-C está apresentado o resultado da passagem da vazão de $38,5\text{L.min}^{-1}$ nos 6,0% e na Foto 4-D está documentado o resultado da passagem da vazão de $51,0\text{L.min}^{-1}$ com o canal colocado em 9,0%.

As fotos 1 e 2, na Figura 5.28., foram realizadas após a passagem dos $10,0$ e dos $25,5\text{L.min}^{-1}$ com o canal colocado nos 3,0%, ou seja, após eventos em que a potência do escoamento atingiu $0,06$ e $0,14\text{N.s}^{-1}$, respectivamente (Figura 5.27.). Portanto, é possível perceber muito pouco sedimento em cada potes coletores, especialmente, na primeira foto.

Com base no que foi discutido no item 5.5.3.-a, seriam consideradas partículas mais leves, de menor diâmetro (finos) e que seriam transportadas via suspensão. Na foto de número 2, ocorreu uma aumento na concentração de partículas sólidas no escoamento superficial nos primeiros seis potes. Mas, que foi decaindo conforme avançava o ensaio. É possível inferir que tais partículas sejam de diâmetro superior àquelas observadas na primeira foto, com um d_{50} da ordem de 0,35mm (Tabela 5.7.).

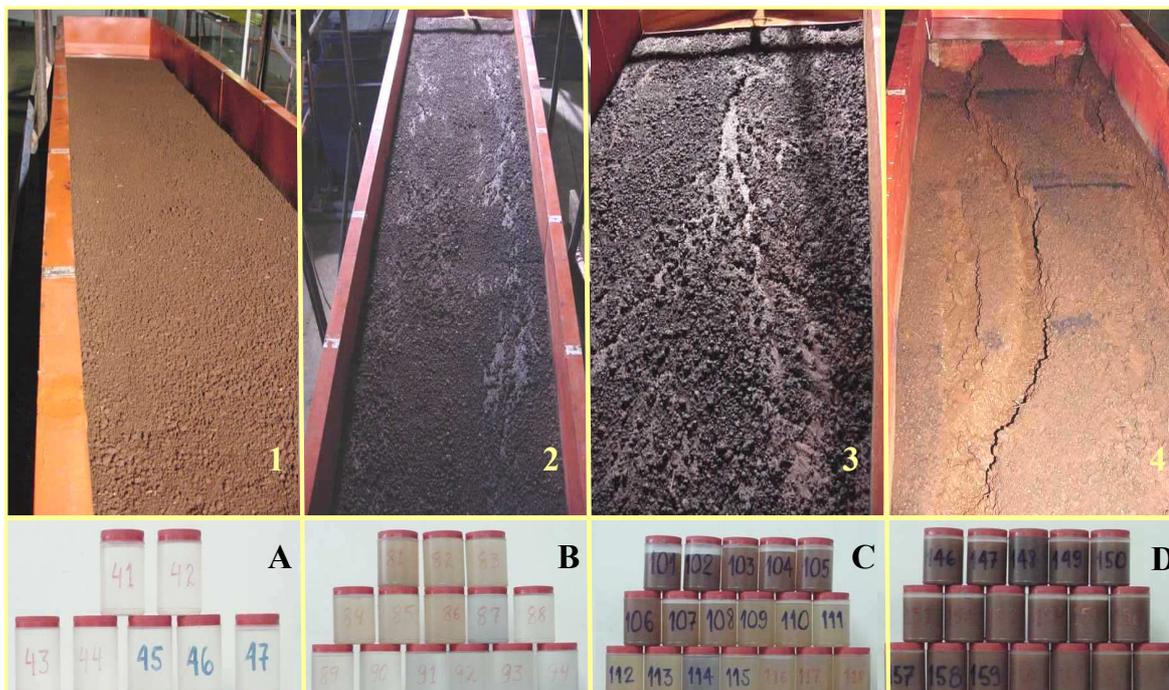


Figura 5.28.- Visualização das fases evolutivas dos sulcos (1,2,3 e 4) e da quantidade de partículas sólidas, coletadas nos potes, antes do escoamento superficial alcançar o reservatório (A, B, C e D).

As duas imagens finais foram obtidas com o canal na declividade de 6,0% (3) e na declividade de 9,0% (4). Na primeira imagem, o sulco já está definido, ou seja, ela foi realizada logo após a passagem dos $38,5\text{Lmin}^{-1}$, em que o sulco já estava avançando para a fase de aprofundamento e a potência do escoamento era de $0,42\text{N.s}^{-1}$ (Figura 5.27.); portanto, existe uma grande quantidade de partículas sólidas nos primeiros potes que estão diminuindo conforme o ensaio avança. A partir deste momento, se poderia dizer que teremos partículas de maior diâmetro (d_{50} de 0,38mm) sendo transportadas via associação suspensão/saltação.

A foto de número 4, ilustra como ficou a superfície do maciço logo após a passagem dos $51,0\text{L.min}^{-1}$, com o canal na declividade de 9,0%. Neste evento, a potência do escoamento chegou a $0,50\text{N.s}^{-1}$; já que, o escoamento apresentava uma alta energia. Portanto, nessas condições é possível perceber a presença de dois sulcos de erosão que ocupam praticamente toda a extensão do canal e os potes de coleta estão totalmente cheios de partículas sólidas, desde o início do evento. Foi possível observar no fundo de alguns desses potes agregados

com, aproximadamente, 10,0mm de diâmetro. O d_{50} com certeza iria superar os 0,61mm (Tabela 5.7.) caso o teste não fosse terminado 20 minutos antes do prazo pré-estabelecido.

5.3.5.- Carga de sedimento média em transporte

Para as vazões, deste estudo, que passaram sobre a superfície do maciço de solo após a incisão de pelo menos um sulcos de erosão, a carga de sedimento média em transporte no canal foi determinada a partir da perda de solo total distribuída ao longo da largura efetiva do escoamento superficial e do tempo de duração de cada um dos ensaios.

Estas cargas de sedimento médias, geradas nos ensaios em que os sulcos de erosão estavam aprofundando, alargando e, portanto, definindo a sua conformação final, foram comparadas com as cargas médias de sedimentos geradas em outros estudos que trabalharam com erosão em sulcos, conduzidos em solos de textura arenosa do Estado do Rio Grande do Sul, tais como Giasson (1992) e Cantalice (2002), que desenvolveram trabalhos em Eldorado do Sul na Estação Agronômica da UFRGS em um Argissolo Vermelho distrófico típico (areia $616,0\text{g.kg}^{-1}$, silte $171,0\text{g.kg}^{-1}$ e argila $213,0\text{g.kg}^{-1}$) e Braida (1994), que desenvolveu o estudo em Santa Maria na Estação de Pesquisa da FEPAGRO em um Argissolo Vermelho distrófico arênico (areia $755,0\text{g.kg}^{-1}$, silte $101,0\text{g.kg}^{-1}$ e argila $114,0\text{g.kg}^{-1}$).

Na Figura 5.29. é apresentada a relação entre a carga de sedimento média em transporte pela fluxo e a potência unitária do escoamento calculada para cada um dos eventos realizados com solo argiloso e solo arenoso.

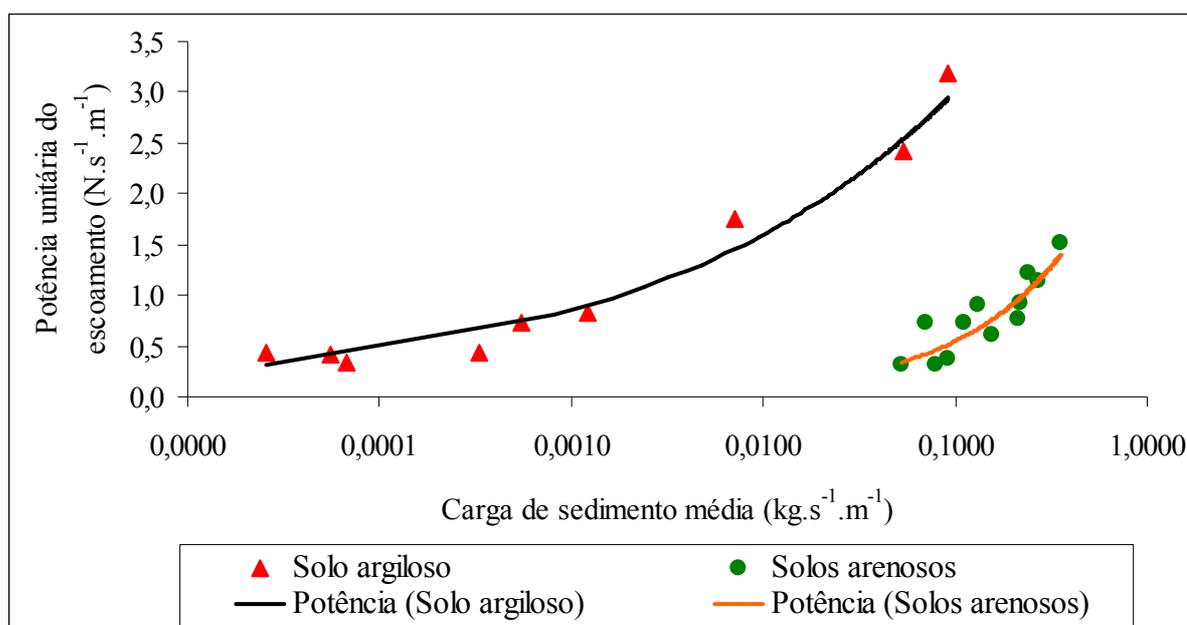


Figura 5.29.- Relação entre a carga de sedimento média e a potência unitária do escoamento para os solos com predominância da fração areia e para os solos com predominância da fração argila.

É possível observar uma clara separação entre o fluxo de sedimentos gerado no solo com predominância da fração argila e aquele fluxo gerado nos três solos onde predomina a fração areia. Um mesmo valor de potência unitária do escoamento gera bem mais sedimento em um solo de textura arenosa do que em um solo de textura argilosa, com diferenças que podem chegar a uma ordem de magnitude de duas a três "décadas" (potência de 10).

Para cada um dos dois grupos de solos (argiloso e arenoso) foi ajustada uma correlação entre a carga de sedimento média em transporte pelo escoamento superficial canalizado (q_s) e a potência unitária do escoamento (PU), através da seguinte expressão:

$$PU = a.q_s^b$$

Os coeficientes a e b estão apresentados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17.- Correlações encontradas entre a carga média de sedimentos e a potência unitária do escoamento.

Tipo de solo	a	b	R ²
Argiloso	5,6546	0,2741	0,937
Arenoso	3,0304	0,7452	0,7346

À medida que a potência do escoamento aumenta, observa-se uma diminuição na diferença entre a carga de sedimentos gerada pelo solo argiloso e pelos solos arenosos. Analisando o comportamento das tendências ajustadas e apresentadas na tabela 5.17., percebe-se que em uma condição de potência unitária baixa, por exemplo $0,50N.s^{-1}.m^{-1}$, a estimativa da carga de sedimentos média para solos arenosos é cerca de 600 vezes maior do que aquela encontrada para o solo argiloso. Para a condição de potência unitária alta, por exemplo $2,50N.s^{-1}.m^{-1}$, esta relação cai para 15.

Comprova-se, assim, que toda e qualquer transferência de informações estabelecidas a partir de dados experimentais obtidos em solos não argilosos envolve uma série de incertezas e riscos, justamente por estar sendo desprezada a ação físico-química das argilas sobre o processo erosivo.

Entretanto, o fato da diferença entre as cargas geradas nos dois grupos de solos diminuir à medida que a potência do escoamento aumenta, sugere a existência de um limite a partir do qual a resistência ao arrancamento/destacamento devido a coesão do solo deixa de ser importante perante a energia que o fluxo transfere ao maciço de solo.

Portanto, fica claro que é importante, a partir de agora, definir uma metodologia de trabalho e desenvolver novos estudos envolvendo diferentes tipos de solo (texturas), vários níveis de escoamento superficial, diversas declividades, tanto em condições de campo como de laboratório, para que no futuro seja possível obter estimativas cada vez mais precisas da

carga de sedimentos gerada em diferentes locais e/ou regiões começando pelo Estado do Rio Grande do Sul e, posteriormente, avançando para o restante do Brasil.

6.- Conclusões e Recomendações

Com base nos resultados experimentais obtidos nas Etapas I e II deste estudo, onde foi concebida e testada uma metodologia para gerar sulcos de erosão em solo argiloso, a partir de incrementos na vazão e na declividade e, depois do sulco consolidado, se buscou definir as suas fases evolutivas e compreender quais são as características do fluxo e que tipo de partículas são transportadas pelo escoamento já canalizado, é possível concluir que:

A estrutura experimental planejada e construída para a geração dos sulcos se mostrou eficiente e de fácil operação. Além disso, permitiu quantificar os parâmetros hidráulicos, a concentração de sedimentos e avaliar o avanço do processo de desagregação em solo de origem agrícola.

A perda total de solo sofre um aumento brusco a partir do momento em que ocorre, sobre a superfície do maciço de solo, a passagem da vazão de incisão. A concentração do escoamento causa uma diminuição na largura efetiva do fluxo; aumenta a profundidade e elevam-se os parâmetros hidráulicos.

O escoamento superficial passou da condição de difuso para concentrado a partir do momento em que a velocidade superficial do fluxo foi de $0,26\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, a altura de lâmina alcançou $0,0102\text{m}$, a velocidade de cisalhamento do escoamento foi de $0,059\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, a tensão de cisalhamento era de $3,50\text{Pa}$ e a potência do escoamento atingiu $0,22\text{N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, com o canal colocado na declividade de $3,0\%$.

A velocidade de cisalhamento, na declividade de $3,0\%$, obtida para o momento de incisão foi, praticamente o dobro, do valor apresentado na literatura, para solos de textura arenosa e siltosa, como sendo o referencial para que o escoamento superficial passe da condição difuso para concentrado.

Para todas as vazões e declividades avaliadas o processo de incisão teve o seu início quando o escoamento superficial estava em regime sub-crítico e de transição e a fase de sulco definido ocorreu somente quando o escoamento estava em regime turbulento.

Antes da incisão, quando o fluxo ainda é difuso, a declividade da linha de energia coincide com a declividade inicial do fundo do canal. Os processos de erosão/deposição causam mudanças na profundidade e na cota do fundo do canal, que se refletem na

declividade da linha de energia; a qual deixa de ser coincidente com a declividade inicial do canal.

O aumento da energia do escoamento superficial fez com que o ponto de incisão se aproximasse cada vez mais do ponto de entrada de água no canal. Portanto, logo após a incisão de pelo menos um sulco, o valor médio do d_{50} das partículas desagregadas e transportadas foi da ordem de 0,51mm, a tensão de cisalhamento máxima do fluxo atingiu 14,89Pa, a velocidade de cisalhamento máxima foi de $0,122\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, a potência do escoamento máxima atingiu $0,54\text{N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ e a perda de solo total, nos $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ dos 9,0%, chegou a 63,58kg.

O fator perda de carga de Darcy Weisbach não se mostrou adequado para estimar a resistência oferecida pela superfície do maciço de solo e pelas paredes do(s) sulco(s) em desenvolvimento à passagem do escoamento superficial.

A tensão de cisalhamento foi o parâmetro hidráulico que apresentou as melhores condições para descrever o crescimento da perda de solo, conforme foi aumentando a capacidade de desagregação do escoamento superficial.

A potência do escoamento foi o parâmetro hidráulico que mostrou maior eficiência para separar (definir os limites) as diferentes fases de evolução dos sulcos de erosão que se desenvolveram na superfície do maciço de solo. A seqüência das fases de desenvolvimento dos sulcos são:

- Condição de pré-incisão (escoamento difuso): sem a presença de sulcos de erosão, com a potência do escoamento oscilando entre 0,057 e $0,198\text{N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$.
- Fase intermediária (incisão): zona de transição, incluindo a fase de aprofundamento, com a potência do escoamento variando entre 0,220 e $0,280\text{N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$.
- Fase final (escoamento concentrado): sulco definido, com a potência do escoamento variando entre 0,3146 a $0,544\text{N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$.

Para as vazões declividades máximas, depois que o(s) sulco(s) passaram para a fase de sulco definido, o tipo de transporte das partículas desagregadas foi predominantemente a associação entre a suspensão e a saltação, sendo que as partículas transportadas nesses eventos foram aquelas de maior peso.

As cargas de sedimento geradas (q_s), nos solos de diferentes classes texturais, foram separadas em dois grupos distintos em função do crescimento da potência unitária do escoamento (P_u), de forma tão clara que permitiu o ajuste das seguintes relações. Para solo

argiloso, $q_s = 5,6546.Pu^{0,2741}$, com um R^2 de 0,937 e para os solos arenosos, $q_s = 3,0304.Pu^{0,7452}$, com um R^2 de 0,7346.

Existe uma tendência que sugere que a diferença entre as cargas de sedimento geradas em solos argilosos e arenosos, para uma mesma potência unitária do escoamento, diminua à medida que a potência aumente de valor.

No que diz respeito às recomendações de melhoria e para a continuidade dos estudos no âmbito da caracterização hidráulica e sedimentológica dos processos de concentração de escoamentos, pode-se sugerir:

- **Com relação à infra-estrutura experimental:** seria fundamental que para a seqüência dos trabalhos desenvolvidos dentro desta linha de pesquisa se pensasse em um canal mais largo, com maior profundidade e com um sistema de regulagem da vazão sem que o fluxo precise passar diretamente sobre a superfície do maciço de solo. Outro ponto a considerar, é a filmagem do evento. Entretanto, o planejamento das tarefas a serem realizadas durante o ensaio deve ser extremamente detalhado, uma vez que, por exemplo, a cada 10 minutos a área de filmagem (superfície do solo) deve estar "livre" para que a gravação seja realizada por pelo menos 30 segundos a 1,0 minuto. É importante ressaltar que durante o desenvolvimento da primeira etapa deste estudo foi aprimorada a técnica e o equipamento que faz a leitura da rugosidade superficial através do sistema Laser. A inclusão desse equipamento fez com que o estudo se tornasse mais detalhado e a espacialização das informações se tornasse mais fácil e que a qualidade da representação em planta da superfície do maciço geradas no programa Surfer® fosse melhor.

- **Com relação às avaliações quantitativas realizadas durante os eventos:** seria importante se pensar em desenvolver um sistema eficiente, de fácil operação e barato para fazer levantamento da velocidade do escoamento superficial, como por exemplo, através da concentração de sais. O levantamento das alturas de lâmina e do fundo do sulco deve ser realizado em intervalos menores, como foi feito neste estudo, em conjunto com a velocidade e a concentração de sedimentos. Para que isso ocorra é necessário que uma pessoa seja treinada somente para essa função e se escolha um local estratégico para ela se localizar. Além disso, é importante levantar com a maior riqueza de detalhes possível a seção transversal do(s) sulco(s) de erosão, para que os parâmetros geométricos que caracterizam esse sulco sejam os mais precisos possíveis.

- **Com relação ao tipo de material:** Os próximos trabalhos deveriam dedicar atenção especial ao tipo de material que está sendo colocado dentro do canal. Mesmo que não haja peneiração do solo, tentar deixar o maciço o mais uniforme possível, buscar um método de determinação das granulometria das partículas desagregadas e transportadas que seja menos destrutivo ou mesmo rever o tempo de agitação dos métodos tradicionais e se possível avaliar como ocorre o processo de destruição (redução de tamanho) dos agregados maiores conforme eles vão avanço na superfície do maciço, desde a seção I até chegarem a cuba de coleta.

- **Com relação à continuidade dos estudos de geração de sulcos em meio coesivo:** é fundamental que se pense em levantar detalhadamente o perfil de velocidades do escoamento superficial em zonas de escoamento difuso e concentrado, além das zonas de deposição e alta rugosidade. Nessas zonas, escolher locais estratégicos para estimar a partir do perfil de velocidades a tensão de cisalhamento que está agindo naquele ponto específico da superfície do maciço de solo. O perfil de velocidade poderia ser levantado tanto por sonda Pitot como por anemometria. Entretanto, o uso desses instrumentos só é viável em água clara, ou seja, nas condições em que os sulcos são gerados é impossível usar tanto a sonda Pitot como o anemômetro. Portanto, moldar os sulcos e recolocá-los em um canal sob a ação de um fluxo igual àquele em que ele foi gerado é o caminho mais indicado.

A proposta para os próximos trabalhos é formar uma biblioteca com as diferentes formas de fundo geradas após a passagem das vazões com o canal colocado em diferentes declividades, através do uso do processo de moldagem da superfície do maciço formado como solo de diferentes classes texturais oriundos de vários locais do estado do Rio Grande do Sul e do Brasil.

E, finalmente, depois que a metodologia experimental e de avaliação dos parâmetros hidrossedimentométricos estiver afirmada incluir a variável chuva no processo de geração de sulcos em meio coesivo. Desta forma, estaremos realizando o caminho completo, ou seja, desde o impacto da gota da chuva até coleta da concentração de sedimentos antes deles chegarem ao reservatório final.

7.- Referências Bibliográficas

ABRAHAMS, A.D.; PARSONS, A.J.; LUK, S.H. Resistance to overland flow on desert hillslopes. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 88, n. 3/4, p. 343-363, 1986.

ABRAHAMS, A.D.; PARSONS, A.J. 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, 1991.

ABRAHAMS, A.D.; ATKINSON, J.F. Relation between grain velocity and sediment concentration in overland flow. **Water Resources Research**, Washington, v. 29, n. 9, p. 3021-3028, Sept. 1993.

ABRAHAMS, A.D.; LI, G. Effect of saltating sediment on flow resistance and bed roughness in overland flow. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v. 23, p. 953-960, 1998.

ALBERTS, E.E.; NEARING, M.A.; WELTZ, M.A.; RISSE, L.M.; PIERSON, F.B.; ZHANG, X.C.; LAFLÉN, J.M.; SOMANTON, J.R. Soil component. In: **USDA water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation**. West Lafayette: USDA, 1995. ch. 7. (National Soil Erosion Research Laboratory. Report n. 10).

ALONSO, C.V.; NEIBLING, W.H.; FOSTER, G.R. Estimating sediment transport capacity in watershed modelling. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph v. 24, n. 5, p. 1211-1220, 1226, 1981.

ASSELIN, J.; CUSTODE, E.; NONI, G. de.; LÓPEZ, A.; LÓPEZ, C.; TRUJILLO, G.; VIENNOT, M. **La simulacion de lluvia: metodologia y practicas**. Quito: Ministerio de Agricultura y Ganaderia/OSTOM, 1993. 66 p.

AZIZ, N.M.; SCOTT, D.E. Experiments on sediment transport in shallow flows in high gradient channels. **Hydrological Sciences Journal**, Wallingford, v. 34, n. 4, p.465-478, 1989.

BAGNOLD, R.A. An approach to the sediment transport problem from general physics. In: _____. **The physics of sediment transport by wind and water**. New York: American Society of Civil Engineers, 1966. 359 p.

BAGNOLD, R.A. Bedload transport by natural rivers. **Water Resources Research**, Washington, v. 31, p. 303-311, 1977.

BERTOLINI, D.; LOMBARDI NETO, F.; DRUGOWICH, M. I. **Programa Estadual de Microbacias Hidrográficas**. Campinas, CATI, 1993. 15p.

BORDAS, M.P.; SEMMELMANN, F.R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre, Ed. da UFRGS : ABRH, 1997. p. 915-943. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 4).

BORGES, A.L. de O. **Determinação da capacidade de transporte por arraste de um escoamento sobre fundo móvel.** 1987. 166 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1987.

BRADFORD, J.M.; FARRELL, D.A.; LARSON, W.E. Mathematical evaluation of factors affecting gully stability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 37, p.103-107, 1973.

BRAIDA, J.A. **Relações da erosão em entressulcos com resíduos vegetais em cobertura e erosão em sulcos em um solo podzólico vermelho escuro.** 1994. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

BRAIDA, J.A.; CASSOL, E.A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico vermelhoescuro franco-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n.1, p.127-134, 1996.

BRYAN, R.B. Processes and significance of rill development. **Catena Supplement**, Cremlingem, n. 8, p.1-15, 1987.

BRYAN, R.B.; POESEN, J. Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v.14, p. 211-231, 1989.

BRYAN, R.B. Knickpoint evolution in rillwash. **Catena Supplement**, Cremlingem, n.17, p.111-132, 1990.

CANTALICE, J.R.B. **Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo.** 2002. 140 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

CAUDURO, F.A.; DORFMANN, R. **Manual de ensaios de laboratório e campo para irrigação e drenagem.** Brasília: PRONI, [1990]. 216 p.

CHOW, V.T. **Open channel hydraulics.** New York: McGraw-Hill, 1959. 667 p.

COOK, H.L. The nature and controlling variables of the water erosion process. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 1, p. 487-494, 1936.

CROUCH, R.J.; NOVRUZI, T. Threshold conditions for rill initiation on vertisol, gunnedah N.S.W., Australia. **Catena**, Amsterdam, v.16, p.101-110, 1989.

DERPSCH, C. H.; ROTH, C.H.; SIDIRAS, N.; KÖPKE,U. **Controle da erosão no Paraná, Brasil:** sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ); Londrina: IAPAR, 1991. 272p.

EINSTEIN, H.A. **The bed-load function for sediment transportation in open channel flows.** Washington: Soil Conservation Service. 71 p. (Technical Bulletin, 1026)

- EINSTEIN, H.A.; BARBAROSSA, N.L. River channel roughness. **Transactions of the ASCE**, New York, v.117, p.1121-1132, 1952.
- ELLIOT, W.J. **A process based rill erosion model**. 1988. 110 p. Tese. (Ph.D.) - Iowa State University, Ames.
- ELLISON, W.D. Soil erosion studies – part I. **Agricultural Engineering**, Saint Joseph, v. 28, p.145-146, 1947a.
- ELLISON, W.D. Soil erosion studies – part II: soil detachment hazard by raindrop splash. **Agricultural Engineering**, Saint Joseph, v. 28, p.197-201, 1947b.
- ELLISON, W.D. Soil erosion studies – part IV: soil transportation in the splash process. **Agricultural Engineering**, Saint Joseph, v. 28, p. 349-353, 1947c.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1979. Não paginado.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412 p.
- FAVIS-MORTLOCK, D.; BOARDMAN, J.; PARSONS, T.; LASCELLES, B. **Emergence and erosion: a model for rill initiation and development**. 1998. Disponível <<http://www.eci.ox.ac.uk/ld/rg2geocomp%5Cgc86.htm>>. Acesso em: 21 nov. 2001.
- FOSTER, G.R.; MEYER, L.D. A closed-form equation for soil erosion upland areas. In: SHEN, H.W. (Ed.). **Sedimentation**. Fort Collins: Colorado State University, 1972a. ch. 12, p.1-17.
- FOSTER, G.R.; MEYER, L.D. Transport of soil particles by shallow flow. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 15, n. 1, p. 99-102, 1972b.
- FOSTER, G.R.; MEYER, L.D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: **PRESENT and prospective technology for predicting sediment yields and sources**. [S.l.]: USDA-ARS, 1975. p.190-207. (ARS-S – 40).
- FOSTER, G.R. 1982. Modelling the erosion processes. In: HAAN, C.T.(Ed.). **Hydrological modelling of small watersheds**. Saint Joseph: American Society of Agricultural Engineers. p.297-370. (ASAE Monograph, 5).
- FOSTER, G.R.; HUGGINS, L.F. MEYER, L.D. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationships. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v.27, 1984a. p.790-796.
- FOSTER, G.R.; HUGGINS, L.F. MEYER, L.D. A laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relationships. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 27, 1984b. p.797-804.
- FOSTER, G.R.; YOUNG, R.A.; RÖMKENS, M.J.M.; ONSTAD, C.A. Processes of soil erosion by water. In: FOLLETT, R.F.; STEWART, B.A. (Ed.) **Soil erosion and crop productivity**. Madison: American Society of Agronomy, 1985. p.137-162.

GARCIA, E.P. **Contribuição à previsão da capacidade de transporte em canais de fundo fixo e móvel**. 1983. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1983.

GERITS, J.J.P.; LIMA de, J.L.M.P.; VAN DEN BROEK, T.M.W. Overland flow and erosion. In: ANDERSON, M.G.; BURT, T.P.(Ed.). **Process studies in hillslope hydrology**. Chichester: John Wiley, 1990. p.173-214.

GIASSON, E. **Relações da erosão em sulcos com vazões e doses de resíduos vegetais incorporados ao solo**. 1992. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

GIASSON, E.; CASSOL, E.A. Relação da erosão em sulcos com vazões aplicadas e doses de resíduos de trigo incorporados a um plintossolo franco-argiloarenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p.117-125, 1996.

GILLEY, J.E.; FINKNER, S.C. Hydraulic roughness coefficients as affected by random roughness. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 34, p. 897-903, 1991.

GILLEY, J.E.; KOTTWITZ, E.R.; WIEMANN, G.A. Darcy-Weisbach roughness coefficients for gravel and cobble surfaces. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Washington, v.118, p.104-112, 1992.

GILLEY, J.E.; KOTTWITZ, E.R. Darcy-Weisbach roughness coefficients for selected crops. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v.37, p. 467-471, 1994.

GILLEY, J.E.; KOTTWITZ, E.R. Darcy-Weisbach roughness coefficients for surfaces with residue and gravel cover. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 38, p. 539-544, 1995.

GIMENEZ, R.; GOVERS, G.; POESEN, J. **Hydraulics and erosion consideration in eroding rill: an experimental approach**. 2002. Disponível em: <<http://www.kuleuven.ac.be/geography/frg/staff/3784/3784.php?print=1>>. Acesso em: 18 nov. 2004.

GOVERS, G. Selectivity and transport capacity of thin flows in relation with rill erosion. **Catena**, Amsterdam, v.12, p.35-49, 1985.

GOVERS, G.; RAUWS, G. Transporting capacity of overland flow na plane and on irregular beds. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v.11, p. 515-524, 1986.

GOVERS, G. Initiation of motion in overland flow. **Sedimentology**, Oxford, v. 34, p.1157-64, 1987.

GOVERS, G. Grain velocities in overland flow: a laboratory study. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v.14, p. 481-498, 1989.

GOVERS, G.; EVERAERT, W.; POESEN, J.; RAUWS, G.; de PLOEY, J. LAUTRIDOU, J.P. A long flume study of dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v.15, p.313-28, 1990.

GOVERS, G. Evaluation of transporting capacity formulae for overland flow. In: PARSONS, A.J.; ABRAHAM, A.D. (Ed.). **Overland flow**. London: UCL, 1992. p. 243-273.

GUERRA, A.J.T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A.J.T.; da SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M.(Org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p.17-55.

HAAN, C.T.; BARFIELD, B.J.; HAYES, J.C. **Design hydrology and sedimentology for small catchments**. San Diego: Academic Press, 1994. p. 238-310.

HADLEY, R.F.; LAL, R.; ONSTAD, C.A.; WALLING, D.E.; YAIR, A. **Recent developments in erosion and sediment yield studies**. Paris: UNESCO, 1985. 127 p. (Technical Documents in Hydrology)

HAIRSINE, P.B.; ROSE, C.W. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: 1. Sheet flow. **Water Resources Research**, Washington, v. 28, p. 237-243, 1992a.

HAIRSINE, P.B.; ROSE, C.W. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: 2. Rill flow. **Water Resources Research**, Washington, v. 28, p. 245-250, 1992b.

HELMING, K.; RÖMKENS, M.J.M.; PRASAD, S.N. Surface roughness related processes of runoff and soil loss: a flume study. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 243-250, 1998.

HERNANI, L.C.; FREITAS, P.L. de; PRUSKI, F.F.; DE MARIA, I.C.; FILHO, C. de C.; LANDERS, J.N. A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C.V.; JUNIOR, E. de F.; PERES, J.R.R. (Ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SOLOS, 2002. p. 47-60.

HIRSCHI, M.C.; BARFIELD, B.J. KYERMO: a physically based research erosion model. I. Model development. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 31, p. 804-813, 1988.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, Washington, v. 56, p. 275-370, 1945.

HUANG, C.; LAFLEN, J.M. Seepage and soil erosion for a clay loam soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 408-416, 1996.

HUANG, C.; NORTON, L.D. Soil erosion process research: recent progresses and potential impacts on prediction model development. In: OLIVEIRA de, T.S.; ASSIS JR, R.N.; ROMERO, R.E.; SILVA, J.R.C. (Ed.). **Agricultura, sustentabilidade no semi-árido**. Fortaleza: UFC-SBCS, 2000. p. 297-321.

INDA JÚNIOR, A.V.; KLANT, E.; NASCIMENTO, P.C. Composição da fase sólida mineral do solo. In: MEURER, E.J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Genesis, 2004. p.35-71.

JULIEN, P.Y.; SIMONS, D.B. Sediment transport capacity of overland flow. **Transaction of the ASAE**, Saint Joseph, v. 28, p. 755-762, 1985.

LAWS, J.O.; PARSONS, A. The relation of raindrop size to intensity. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v. 24, p. 452-460, 1943.

LEEDER, M. Sediment grains in fluids: settling, transport and feedback. In: _____. **Sedimentology and sedimentary basins**. London: Blackwell Science, 1999. p.123-142.

MANTZ, P.A. Incipient transport of fine grains and flakes of fluid: extended shields diagram. **Transactions of the ASCE**, Saint Joseph, v. 103, p. 601-615, 1977.

MENDOZA, C.; ZHOW, D. A dynamic approach to sediment-land turbulent flows. **Water Resources Research**, Washington, v. 31, p. 3075-3087, 1995.

MERRIT, E. The identification of four stages during micro-rill development. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v. 9, p. 493-496, 1984.

MERTEN, G.H. **Dinâmica da erosão em sulcos alterada pelo incremento de descarga sólida**. 2000. 116 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

MERTEN, G.H.; NEARING, M.A.; BORGES, A.L.O. Effect of sediment load on soil detachment and deposition in rills. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 861-868, 2001.

MEYER, L.D. **An investigation of methods for simulating rainfall on standard runoff plots and a study of the drop size, velocity and kinetic energy of selected spray nozzles**. [S.l.]: USDA-ARS, 1958. 43 p. (Special Report, n. 81).

MEYER, L.D.; MONKE, J.E. Mechanics of soil erosion by rainfall and overland flow. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 8, p. 72-577, 1965.

MEYER, L.D.; WISCHMEIER, W.H. Mathematical simulation of the processes of soil erosion by water. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v.12, p.754-758, 762, 1969.

MEYER, L.D.; FOSTER, G.R.; RÖMKENS, M.J.M. Source of soil eroded by water from upland slopes. In: **PRESENT and prospective technology for predicting sediment yields and sources**. [S.l.]: USDA-ARS, 1975. p.177-189. (ARS-S-40).

MOORE, L.D.; BURCH, G.J. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory. **Water Resources Research**, Washington, v. 22, p.1350-1360, 1986.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation**. 2. ed. Essex: Longman, 1996. 198 p.

- 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. 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, 1998.
- MOSS, A.J.; GREEN, P.; HUTKA, J. Small channels: their experimental formation, nature, and significance. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v. 7, p. 401-415, 1982.
- NEARING, M.A.; FOSTER, G.R.; LANE, L.J.; FINKNER, S.C. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 32, p.1587-1593, 1989.
- NEARING, M.A.; BRADFORD, J.M.; PARKER, S.C. Soil detachment by shallow flow at low slopes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 339-344, 1991.
- NEARING, M.A.; PARKER, S.C. Detachment of soil by flowing water under turbulent and laminar conditions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p.1612-1614, 1994.
- NEARING, M.A.; NORTON, L.D.; BULGAKOV, D.A.; LARIANOV, G.A.; WEST, L.T.; DONTSOVA, K.M. Hydraulics and erosion in eroding rills. **Water Resources Research**, Washington, v. 33, p. 865-876, 1997.
- NEZU, I.; NAKAGAWA, H. Effect of coherent turbulence on sediment transport. In: _____. **Turbulence in open-channel flows**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1993. p.251-262.
- PARCHEN, C.A.P.; BRAGAGNOLO, N. **Erosão e conservação dos solos no Paraná**. Curitiba: EMATER, 1991. 16p.
- PEARCE, A.J. Magnitude and frequency of erosion by Hortonian overland flow. **Journal of Geology**, Chicago, v. 84, p. 65-80, 1976.
- POLYAKOV, V.O.; NEARING, M.A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. **Catena**, Amsterdam, v. 51, p. 33-43, 2003.
- PROSSER, I.P.; DIETRICH, W.E. Field experiments on erosion by overland flow and their implication for a digital terrain model of channel initiation. **Water Resources Research**, Washington, v. 31, p. 2867-2876, 1995.
- RAUDKIVI, A.J. Sediment transport. In: _____. **Loose boundary hydraulics**. Oxford: Pergamon, 1990. p.142-209.
- RAUWS, G. The initiations of rill on plane beds of non-cohesive sediments. **Catena Supplement**, Cremlingen, n. 8, p.107-118, 1987.
- RAUWS, G.; GOVERS, G. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 39, p.111-124, 1988.

REICHERT, J.M.; SCHÄFER, M.J.; ELTZ, F.L.F.; NORTON, L.D. Erosão em entressulcos e em sulcos em função do formato de parcela em Argissolo arênico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 965-973, 2001.

ROSE, C.W. Research progress on soil erosion processes and a basis for soil conservation practices. In: LAL, R. (Ed.) **Soil erosion research methods**. Ankeny: SWCS, 1988. p.119-139.

SAVAT, J. The hydraulics of sheet flow on a smooth surface and the effect of simulated rainfall. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v. 2, p.125-140, 1977.

SAVAT, J. Resistance to flow in rough, supercritical sheet flow. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v. 5, p.103-122, 1980.

SCHÄFER, M.J. **Erosão em entressulcos e em sulcos sob diferentes preparos e consolidação do solo**. 1999. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria., 1999.

SCHMIDT, A.V. Terraceamento na região sul. In: SIMPÓSIO SOBRE TERRACEAMENTO AGRÍCOLA, 1989, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1989. p.23-25.

SHAINBERG, I.; LAFLEN, J.M.; BRADFORD, J.M.; NORTON, L.D. Hydraulic flow and water quality characteristics in rill erosion. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p.1007-1012, 1994.

SCHWAB, G.O.; FANGMEIER, D.D.; ELLIOT, W.J. **Soil and water management systems**. 4. ed. New York: John Wiley, 1996. 371 p.

SELBY, M.J. Hillslope sediment transport and deposition. In: PYE, K.(Ed.) **Sediment transport and depositional processes**. Oxford: Blackwell, 1994. 397 p.

SILVEIRA, A.L.L.; CHEVALLIER, P. Primeiros resultados sobre infiltração em solo cultivado, usando simulação de chuvas (Bacia do rio Potiribu-RS). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9., 1991, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRH, 1991. v.1, p.213-221.

SLATTERY, M.C.; BRYAN, R.B. Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v.17, p.127-146, 1991.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.; KLANT, E.; SCHNEIDER, P.; NASCIMENTO, P.C. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2002. 126 p.

TARQUI, J.L.Z. **Padrões de escoamento de fluido de mistura água-sedimentos em lâmina de pouca espessura**. 2001. 183 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

- TEDESCO, M.J.; VOLKWEISS, S.J.; BOHNEN, H.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A. 1995. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 215 p. (Boletim Técnico de Solos, 5)
- TORRI, D.; SFALANGA, M.; FIRENZE, G.; CHISCI, P. Threshold conditions for incipient rilling. **Catena Supplement**, Cremlingen, n. 8, p.97-105, 1987.
- VANONI, V.A.; NOMICOS, G.N. Resistance properties of sediment-laden streams. **Transaction of the ASAE**, Saint Joseph, v. 125, p.1140-1175, 1960.
- WANG, Z.Y.; REN, Y.M.; WANG, X.K. Total pressure probe for the measurement of turbulence in sediment-laden flows. **Advances in Hydro-Sciences and Engineering**, Beijing, v. 2, p.1875-1882, 1995.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v. 39, p. 285-291, 1958.
- XIAOQING, Y. Soil erosion. In: **MANUAL on sediment management and measurement**. Geneva: World Meteorological Organization, 2003. p.10-27. (Operational Hydrology Report, 47).
- YALIN, M.S. An expression for bed-load transportation. **Journal of the Hydraulics Division** New York, v. 89, p.1805-1825, 1963.
- YANG, C.T. Unit stream power and sediment transport. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 98, p.1805-1825, 1972.
- YANG, C.T. Incipient motion and sediment transport. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 99, p.1679-1703, 1973.
- YANG, C.T. Resistance to flow and bed forms. In: _____. **Sediment transport: theory and practice**. New York: McGraw-Hill, 1996. p.51-89.
- YOUNG, R.A.; WIERSMA, J.L. The role of rainfall impact in soil detachment and transport. **Water Resources Research**, Washington, v. 9, p.1629-1639, 1973.
- ZHU, J.C.; GANTZER, R.L.; PEYTON, R.L.; ALBERTS, E.E.; ANDERSON, S.H. Simulated small-channel bed scour and head cut erosion rates compared. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, p.211-218, 1995.

Anexo A

Dados referentes à velocidade superficial e à altura de lâmina do escoamento obtidos no decorrer de cada um dos 15 eventos ensaiados no canal experimental para as três declividades de trabalho

Anexo A – Velocidade superficial e altura de lâmina

Anexo A.1.-Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 3,0 %

Temperatura da água: 21 °C;

Duração do evento: 60 minutos; e

Vazão: 10 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Altura de lâmina (h) ²		Média das alturas na seção (m) ³
		Avaliação	Seção ¹ h (m)	
2	0,07			
4			1	0,0031
5	0,07			
7			2	0,0033
10	0,08			
11		1	3	0,0043
14			4	0,0029
15	0,07			
17			5	0,0039
20	0,07			
22			6	0,0007
25	0,08		1	0,0033
28			2	0,0020
30	0,07			
32		2	3	0,0037
35	0,07		4	0,0032
37			5	0,0059
40	0,07		6	0,0019
44			1	0,0029
45	0,07			
46			2	0,0022
48			3	0,0041
50	0,07	3	4	0,0030
53			5	0,0114
55	0,07		6	0,0031
60	0,06			
Média	0,07			0,0036

^{1.-} 0,50 x 0,74 m;

^{2.-} Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e

^{3.-} Média das três avaliações realizadas na seção.

Anexo A.2.- Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 3,0 %

Temperatura da água: 19 °C;

Duração do evento: 60 minutos; e

Vazão: 18,5 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Altura de lâmina (h)			Média das alturas na seção (m) ³
		Avaliação	Seção ¹	h (m)	
1	0,16				
5	0,17		1	0,0098	
10	0,18		2	0,0064	
13			3	0,0050	
15	0,18	1			
17			4	0,0075	
19			5	0,0114	
20	0,18				
22			6	0,0076	
25	0,18				
26			1	0,0099	0,0099
28			2	0,0054	0,0056
30	0,18				
31		2	3	0,0050	0,0051
33			4	0,0090	0,0078
35	0,17				
37			5	0,0111	0,0107
38			6	0,0064	0,0067
40	0,17		1	0,0099	
43			2	0,0051	
45	0,17				
46			3	0,0053	
49			4	0,0068	
50	0,17	3			
54			5	0,0096	
55	0,17				
58			6	0,0061	
60	0,17				
Média	0,17			0,0076	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e

³- Média das três avaliações realizadas na seção

Anexo A.3.- Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 3,0 %

Temperatura da água: 12 °C;

Duração do evento: 60 minutos; e

Vazão: 25,5 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Avaliação	Altura de lâmina (h)		Média das alturas na seção (m) ³
			Seção ¹	h (m)	
1	0,22				
5	0,22		1	0,0063	
8			2	0,0101	
10	0,22	1	3	0,0064	
12			4	0,0045	
15	0,22		5	0,0140	
19			6	0,0090	
20	0,22				
22			1	0,0083	0,0071
25	0,21		2	0,0088	0,0068
27		2	3	0,0053	0,0064
30	0,22		4	0,0064	0,0061
34			5	0,0129	0,0132
35	0,21				
37			6	0,0090	0,0093
39			1	0,0071	
40	0,21				
41			2	0,0090	
43		3	3	0,0077	
45	0,21		4	0,0067	
46			5	0,0128	
48			6	0,0095	
50	0,21		1	0,0068	
52			2	0,0094	
53			3	0,0062	
55	0,20	4	4	0,0068	
57			5	0,0131	
58			6	0,0098	
60	0,20				
Média	0,21			0,0086	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e

³- Média das quatro avaliações realizadas na seção.

Anexo A.4.- Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 3,0 %

Temperatura da água: 13,5 °C;

Duração do evento: 75 minutos; e

Vazão: 38,5 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Altura de lâmina (h)			Média das alturas na seção (m) ³
		Avaliação	Seção ¹	h (m)	
1	0,26				
5	0,27		1	0,0121	
7			2	0,0087	
9			3	0,0106	
10	0,26	1			
12			4	0,0254	
14			5	0,0150	
15	0,26				
16			6	0,0107	
17			1	0,0144	
19			2	0,0086	
20	0,27				
21			3	0,0116	
23		2	4	0,0174	
24			5	0,0159	
25	0,27				
26			6	0,0109	
28			1	0,0124	0,0132
30	0,26		2	0,0076	0,0083
32			3	0,0113	0,0113
35	0,27	3	4	0,0210	0,0214
36			5	0,0149	0,0154
38			6	0,0116	0,0112
40	0,26		1	0,0130	
42			2	0,0080	
43			3	0,0113	
45	0,26	4	4	0,0213	
46			5	0,0155	
49			6	0,0109	
50	0,26				
51			1	0,0139	
52			2	0,0085	
54		5	3	0,0116	
55	0,26		4	0,0220	
57			5	0,0155	
58			6	0,0121	
60	0,27				
65	0,26				
70	0,26				
75	0,26				
Média	0,26			0,0135	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e ³- Média das cinco repetições realizadas na seção.

Anexo A.5.- Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 3,0 %

Temperatura da água: 16 °C;

Duração do evento: 90 minutos;

Vazão: 51,0 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Altura de lâmina (h)			Média das alturas na seção (m) ³
		Avaliação	Seção ¹	h (m)	
1	0,31				
2			1	0,0150	
4			2	0,0145	
5	0,31				
6		1	3	0,0093	
8			4	0,0233	
10	0,33				
11			5	0,0132	
14			6	0,0203	
15	0,34				
16			1	0,0142	0,0129
19			2	0,0148	0,0134
20	0,34				
21		2	3	0,0092	0,0086
23			4	0,0172	0,0197
25	0,34		5	0,0113	0,0114
28			6	0,0206	0,0203
30	0,34				
32			1	0,0156	
35	0,34		2	0,0132	
37		3	3	0,0080	
38			4	0,0193	
40	0,35		5	0,0109	
43			6	0,0206	
45	0,34				
48			1	0,0167	
50	0,35		2	0,0109	
52		4	3	0,0079	
54			4	0,0190	
55	0,34		5	0,0103	
60	0,34		6	0,0200	
65	0,33				
70	0,33				
75	0,33				
80	0,34				
85	0,33				
90	0,33				
Média	0,33			0,0148	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2. e ³- Média das quatro avaliações realizadas na seção.

Anexo A.6.- Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 6,0 %

Temperatura da água: 25 °C;

Duração do evento: 60 minutos; e

Vazão: 10,0 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Altura de lâmina (h)			Média das alturas na seção (m) ³
		Avaliação	Seção ¹	h (m)	
1	0,16				
5	0,16				
10	0,16				
14			6	0,0071	
15	0,17				
18			5	0,0028	
20	0,16	1			
21			4	0,0070	
24			3	0,0014	
25	0,16				
28			2	0,0022	
30	0,15				
31			1	0,0047	
34			6	0,0071	0,0073
35	0,13				
37			5	0,0028	0,0026
39		2	4	0,0070	0,0070
40	0,17				
41			3	0,0014	0,0016
43			2	0,0033	0,0030
45	0,16				
46			1	0,0054	0,0052
48			6	0,0077	
50	0,17				
51			5	0,0023	
53			4	0,0069	
54		3	3	0,0019	
55	0,15				
56			2	0,0036	
58			1	0,0055	
60	0,16				
Média	0,16			0,00445	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e

³- Média das três avaliações realizadas na seção.

Anexo A.7.- Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 6,0 %

Temperatura da água: 21 °C;

Duração do evento: 60 minutos; e

Vazão: 18,5 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Altura de lâmina (h)			Média das alturas na seção (m) ³
		Avaliação	Seção ¹	h (m)	
1	0,28				
5	0,25				
8			6	0,0041	
10	0,26				
12			5	0,0059	
14		1	4	0,0096	
15	0,17				
17			3	0,0053	
19			2	0,0116	
20	0,28				
21			1	0,0177	
24			6	0,0031	0,0035
25	0,23		5	0,0059	0,0058
27			4	0,0091	0,0093
30	0,18	2			
31			3	0,0058	0,0055
33			2	0,0116	0,0111
34			1	0,0175	0,0174
35	0,23				
37			6	0,0031	
39			5	0,0059	
40	0,24	3			
42			4	0,0091	
45	0,22		3	0,0058	
47			2	0,0109	
48			1	0,0175	
50	0,21		6	0,0037	
51			5	0,0057	
53			4	0,0096	
54		4	3	0,0052	
55	0,18		2	0,0104	
57					
58			1	0,0170	
60	0,23				
Média	0,23			0,0088	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e

³- Média das quatro avaliações realizadas na seção.

Anexo A.8.- Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 6,0 %

Temperatura da água: 18 °C;

Duração do evento: 60 minutos; e

Vazão: 25,5 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Avaliação	Altura de lâmina (h)		Média das alturas na seção (m) ³
			Seção ¹	H (m)	
1	0,29				
4			6	0,0065	
5	0,30				
8			5	0,0113	
10	0,30				
13		1	4	0,0079	
15	0,33				
18	0,33		3	0,0067	
20	0,33				
21			2	0,0043	
23			1	0,0076	
25	0,30				
26			6	0,0088	0,0082
27			5	0,0121	0,0118
29			4	0,0071	0,0077
30	0,28	2			
32			3	0,0071	0,0068
33			2	0,0055	0,0052
34			1	0,0178	0,0149
35	0,31		6	0,0085	
37			5	0,0115	
39			4	0,0069	
40	0,28	3			
41			3	0,0067	
43			2	0,0051	
44			1	0,0172	
45	0,31				
47			6	0,0088	
49			5	0,0124	
50	0,27				
51			4	0,0089	
53		4	3	0,0065	
54			2	0,0057	
55	0,32				
56			1	0,0172	
60	0,31				
Média	0,30			0,0091	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e

³- Média das quatro avaliações realizadas na seção.

Anexo A.9.- Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 6,0 %

Temperatura da água: 17 °C;

Duração do evento: 75 minutos; e

Vazão: 38,5 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Altura de lâmina (h)			Média das alturas na seção (m) ³
		Avaliação	Seção ¹	h (m)	
1	0,35				
4			6	0,0191	
5	0,38				
7			5	0,0081	
10	0,35				
12			4	0,0151	
15	0,28	1			
16			3	0,0129	
20	0,35				
24			2	0,0068	
25	0,33				
26			1	0,0142	
28			6	0,0206	0,0214
30	0,35				
32					
35	0,39		5	0,0072	0,0079
36		2	4	0,0130	0,0098
40	0,28				
41			3	0,0137	0,0136
44			2	0,0063	0,0065
45	0,34				
46			1	0,0143	0,0127
50	0,36				
55	0,32				
56			6	0,0244	
59			5	0,0084	
60	0,36				
64		3	4	0,0114	
65	0,29				
68			3	0,0142	
70	0,31		2	0,0065	
71			1	0,0096	
75	0,36				
Média	0,34			0,0125	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e

³- Média das três avaliações realizadas na seção.

Anexo A.10.- Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 6,0 %

Temperatura da água: 19 °C;

Duração do evento: 60 minutos; e

Vazão: 51,0 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Altura de lâmina (h)			Média das alturas na seção (m) ³
		Avaliação	Seção ¹	h (m)	
1	0,36				
5	0,42				
7			6	0,0211	
9			5	0,0328	
10	0,37				
15	0,37				
16		1	4	0,0318	
20	0,35				
21			3	0,0365	
22			2	0,0626	
23	0,38				
24			1	0,0546	
25	0,40		6	0,0235	0,0228
29			5	0,0364	0,0324
30	0,43				
32			4	0,0288	0,0288
33	0,39	2			
35	0,43		3	0,0235	0,0302
40	0,40				
42			2	0,0540	0,0499
44			1	0,0429	0,0395
45	0,46				
50	0,40				
52	0,48				
54			6	0,0239	
55	0,50				
56		3	5	0,0281	
57			4	0,0258	
58			3	0,0306	
59			2	0,0331	
60	0,39		1	0,0209	
Média	0,41			0,0339	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e

³- Média das três avaliações realizadas na seção.

Anexo A.11.- Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 9,0 %

Temperatura da água: 23 °C;

Duração do evento: 60 minutos; e

Vazão: 10,0 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Altura de lâmina (h)			Média das alturas na seção (m) ³
		Avaliação	Seção ¹	h (m)	
1	0,11		1	0,0026	
2			2	0,0044	
3		1	3	0,0025	
4			4	0,0076	
5			5	0,0033	
6	0,11		6	0,0009	
7			1	0,0034	0,0032
9			2	0,0015	0,0027
10	0,08				
12		2	3	0,0050	0,0038
13			4	0,0041	0,0045
14			5	0,0023	0,0022
15	0,14				
16			6	0,0026	0,0027
20	0,07				
25	0,10				
30	0,06		1	0,0033	
32			2	0,0009	
33		3	3	0,0037	
34			4	0,0038	
35	0,13				
37			5	0,0019	
38			6	0,0027	
40	0,11				
45	0,07				
48			1	0,0033	
50	0,13				
51		4	2	0,0040	
52			3	0,0038	
54			4	0,0025	
55	0,11				
58			5	0,0011	
59			6	0,0019	
60	0,14				
Média	0,10			0,0030	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e

³- Média das quatro avaliações realizadas na seção.

Anexo A.12.- Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 9,0 %

Temperatura da água: 23 °C;

Duração do evento: 60 minutos; e

Vazão: 18,5 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Altura de lâmina (h)			Média das alturas na seção (m) ³
		Avaliação	Seção ¹	h (m)	
1	0,19				
4			1	0,0110	
5	0,17				
8			2	0,0177	
10	0,23	1			
11			3	0,0095	
12			4	0,0060	
13			5	0,0188	
15	0,22				
18			6	0,0121	
20	0,16				
23			1	0,0115	0,0110
25	0,13				
27			2	0,0194	0,0163
29			3	0,0055	0,0071
30	0,22	2			
31			4	0,0057	0,0057
35	0,23				
36			5	0,0161	0,0166
38			6	0,0108	0,0112
40	0,15				
43			1	0,0106	
45	0,14		2	0,0173	
48			3	0,0062	
49		3	4	0,0053	
50	0,21				
52			5	0,0150	
54			6	0,0108	
55	0,16				
60	0,15				
Média	0,18			0,0116	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e

³- Média das três avaliações realizadas na seção.

Anexo A.13.- Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 9,0 %

Temperatura da água: 25 °C;

Duração do evento: 60 minutos; e

Vazão: 25,5 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Avaliação	Altura de lâmina (h)		Média das alturas na seção (m) ³
			Seção ¹	h (m)	
1	0,21				
5	0,23				
9			1	0,0109	
10	0,23				
12			2	0,0174	
15	0,23	1			
18			3	0,0083	
20	0,23		4	0,0180	
23			5	0,0152	
25	0,24				
26			6	0,0145	
30	0,22				
32			1	0,0125	0,0112
33			2	0,0110	0,0138
34			3	0,0067	0,0073
35	0,22	2			
37			4	0,0093	0,0122
40	0,20				
42			5	0,0125	0,0138
44			6	0,0144	0,0145
45	0,19				
46			1	0,0103	
48			2	0,0130	
49			3	0,0070	
50	0,26	3			
52			4	0,0092	
53			5	0,0138	
55	0,24		6	0,0146	
60	0,22				
Média	0,22			0,0121	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e

³- Média das três repetições realizadas na seção.

Anexo A.14.-Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 9,0 %

Temperatura da água: 24 °C;

Duração do evento: 60 minutos; e

Vazão: 38,5 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Altura de lâmina (h)			Média das alturas na seção (m) ³
		Avaliação	Seção ¹	h (m)	
1	0,34				
2			1	0,0161	
3			2	0,0125	
4			3	Falha	
5	0,35	1			
6			4	0,0125	
7			5	0,0082	
8			6	0,0189	
10	0,31				
15	0,28				
20	0,27				
21			1	0,0184	0,0175
22		2	2	0,0120	0,0126
24			3	Falha	Falha
25	0,26		4	0,0133	0,0130
27			5	0,0082	0,0070
28			6	0,0207	0,0242
30	0,30				
35	0,30				
40	0,25				
45	0,24				
47			1	0,0181	
49			2	0,0134	
50	0,31	3			
51			3	Falha	
52			4	0,0133	
53			5	0,0047	
55	0,27				
56			6	0,0330	
60	0,24				
Média	0,29			0,0222	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e

³- Média das três avaliações realizadas na seção.

Anexo A.15.- Valores de velocidade do escoamento superficial e de altura de lâmina (h) levantados em diferentes intervalos de tempo.

Declividade: 9,0 %

Temperatura da água: 25 °C;

Duração do evento: 40 minutos; e

Vazão: 51,0 L.min⁻¹.

Tempo (Minuto)	Velocidade (m s ⁻¹)	Altura de lâmina (h)			Média das alturas na seção (m) ³
		Avaliação	Seção ¹	h (m)	
1	0,42				
3	0,37				
5	0,36				
7			1	Falha	
8		1	2	00143	
10	0,35		3	0,0249	
11			4	0,0192	
13			5	0,0102	
14			6	0,0149	
15	0,34				
18			6	0,0178	0,0162
19			5	0,0064	0,0092
20	0,34				
21		2	4	0,0189	0,0190
23			3	0,0284	0,0254
24			2	0,0246	0,0174
25	0,35				
26			1	0,0245	0,0221
30	0,33				
32			1	0,0198	
33			2	0,0133	
34		3	3	0,0229	
35	0,33		4	0,0189	
37			5	0,0109	
38			6	0,0160	
40	0,34				
Média	0,35			0,0221	

¹- 0,50 x 0,74 m;

²- Medida no alinhamento que divide cada uma das seções de avaliação da superfície do maciço de solo, conforme apresentado na Figura 4.1.2.; e

³- Média das três avaliações realizadas na seção.

Anexo B

Procedimento de cálculo da posição da linha de energia (Ie) e Tabelas contendo parâmetros geométricos que caracterizam os sulcos de erosão e os parâmetros hidráulicos calculados a partir das informações levantadas durante e após cada um dos eventos realizados

Anexo B.- Determinação da posição da linha de energia

B1.- Cálculo do Ie

Uma vez que o substrato que recebe a ação do escoamento superficial é móvel, há uma tendência de que, à medida que a interação entre o escoamento e o contorno sólido comece a se desenvolver, ocorram erosões e deposições, as quais acabam alterando a declividade do fundo do canal. Em outras palavras, mesmo que o maciço de solo seja moldado no canal com uma dada declividade, a ação dos processos erosivos e deposicionais altera esta declividade e, portanto, a profundidade do escoamento.

Em meios deformáveis, não se pode considerar que a declividade da linha de água coincide com a declividade do fundo do canal. Assim, torna-se necessário a determinação da posição da linha de energia. Partindo da conservação de energia (soma de Bernoulli) aplicada às duas seções de escoamento do canal, temos:

$$z_1 + h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_p$$

Onde: H_p é a perda de energia do escoamento entre as duas seções, podendo ser expressa por: $h_p = J.L$, sendo J, a declividade da linha de energia (Ie) e L a distância entre as seções.

Chamando a soma da cota de fundo (z) com a profundidade (h) de cota de linha de água (LA) e a ela acrescentando a taquicarga ($\frac{V^2}{2g}$), temos a cota da linha de energia (LE). Para o trecho do canal em estudo, com seções espaçadas de 0,50m, temos:

- Escolhendo um plano de referência (PR) coincidente com o fundo do canal na seção 6, as cotas de fundo das outras seções tiveram o seu valor corrigido, acrescentando-se à cota de fundo medida, o valor da posição do plano de referência (Δy) nesta seção. A posição do PR nas outras seções do canal (Δy) é dada pelo produto da declividade inicial do fundo do canal (I) com a distância desta seção à seção de referência (seção 6).

A posição da linha de água (LA) em uma seção qualquer é dada pela soma da cota de fundo corrigida com a profundidade média da seção. Somando-se a esta última, a taquicarga na seção, temos a posição da linha de energia. Chamando-a de carga hidráulica (H) temos que, por Bernoulli:

$$H_1 = H_2 + J.L$$

Assim, a declividade da linha de energia fica: $J = \left(\frac{H_1 - H_2}{L} \right)$

Anexo B.2.- Tabela apresentando os parâmetros geométricos levantados e hidráulicos calculados, quando o canal estava na declividade de 3,0%.

	Decliv. (%)	Vazão (L.min ⁻¹)	Seção canal	Área (m ²)	Largura (m)	h Médio (m)	Vel. Média (m s ⁻¹)	Perim. Mo- lhado (m)	R. Hidrau- lico (m)	Decliv. Linha energia (m.m ⁻¹)	"n" Manning	Fator "f"
Média		10,0	3	0,000122	0,52	0,000234	1,369048	0,520468	0,000234	0,0226	xxx	xxx
		10,0	4	0,000600	0,74	0,000811	0,277778	0,741622	0,000809	0,0456	0,0149	0,1523
		10,0	5	0,001661	0,74	0,002244	0,100349	0,744489	0,002231	0,0292	xxx	xxx
						0,001096	0,582391	0,668860	0,001091	0,0325	0,0093	0,1523
Média		18,5	3	0,000313	0,74	0,000423	0,984954	0,740846	0,000423	0,0721	0,0019	0,0036
		18,5	4	0,000409	0,74	0,000552	0,754433	0,741105	0,000551	0,0947	0,0135	0,1049
		18,5	5	0,003226	0,70	0,004609	0,095575	0,709217	0,004549	0,0295	xxx	xxx
						0,001861	0,611654	0,730389	0,001841	0,0654	0,0077	0,0543
Média	3,0	25,5	3	0,000513	0,74	0,000693	0,828390	0,741387	0,000692	0,1102	0,0081	0,0452
		25,5	4	0,001730	0,74	0,002338	0,245603	0,744677	0,002324	0,0254	0,0073	0,0341
		25,5	5	0,001017	0,70	0,001453	0,417735	0,702907	0,001447	0,0520	xxx	xxx
						0,001495	0,497243	0,729657	0,001488	0,0625	0,0077	0,0397
Média		38,5	3	0,008748	0,55	0,015905	0,073352	0,581810	0,015036	0,0209	0,0301	0,3457
		38,5	4	0,001930	0,74	0,002609	0,332395	0,745217	0,002590	0,0655	0,0491	0,9597
		38,5	5	0,008983	0,74	0,012139	0,071434	0,764277	0,011753	0,0233	xxx	xxx
						0,010217	0,159060	0,697102	0,009793	0,0366	0,0396	0,6527
Média		51,0	3	0,007122	0,52	0,013696	0,119353	0,547391	0,013010	0,0286	0,0386	0,5662
		51,0	4	0,003357	0,74	0,004536	0,253238	0,749072	0,004481	0,0684	0,0709	1,8664
		51,0	5	0,011104	0,74	0,015006	0,076547	0,770012	0,014421	0,0250	xxx	xxx
						0,011079	0,149713	0,688825	0,010637	0,0407	0,0547	1,2163

Anexo B.3.- Tabela apresentando os parâmetros geométricos levantados e hidráulicos calculados, quando o canal estava na declividade de 6,0%.

	Decliv. (%)	Vazão (L.min ⁻¹)	Seção canal	Área (m ²)	Largura (m)	h Médio (m)	Vel. Média (m s ⁻¹)	Perim. Mo- lhado (m)	R. Hidrau- lico (m)	Decliv. Linha energia (m.m ⁻¹)	"n" Manning	Fator "f"
Média	10,0	1	0,006565	0,74	0,008872	0,025386	0,757744	0,008664	xxx	xxx	xxx	
	10,0	2	0,003774	0,60	0,006290	0,044163	0,612580	0,006161	0,0697	0,2886	33,5000	
	10,0	3	0,002957	0,58	0,005097	0,056373	0,590195	0,005009	0,0771	0,1739	13,3642	
	10,0	4	0,003661	0,67	0,005464	0,045527	0,680928	0,005376	0,0835	0,1701	13,1057	
	10,0	5	0,004809	0,71	0,006773	0,034659	0,723546	0,006646	0,0613	0,2041	17,9798	
	10,0	6	0,004070	0,62	0,006564	0,040954	0,633128	0,006428	0,0704	0,2453	25,2396	
Média					0,006510	0,041177	0,666353	0,006381	0,0724	0,2164	20,6378	
Média	18,5	1	0,005730	0,71	0,008071	0,053806	0,726142	0,007892	xxx	xxx	xxx	
	18,5	2	0,009191	0,74	0,012421	0,033546	0,764841	0,012017	0,0682	0,2766	27,9106	
	18,5	3	0,004313	0,68	0,006343	0,071489	0,692685	0,006227	0,0702	0,2202	18,2121	
	18,5	4	0,004687	0,65	0,007211	0,065785	0,664421	0,007054	0,0561	0,1219	6,2010	
	18,5	5	0,003470	0,55	0,006308	0,088868	0,562617	0,006167	0,0746	0,1244	6,4730	
	18,5	6	0,006252	0,74	0,008449	0,049316	0,756898	0,008260	0,0594	0,1316	7,0364	
Média					0,008134	0,060468	0,694601	0,007936	0,0657	0,1750	13,1666	
Média	25,5	1	0,006278	0,71	0,008843	0,067694	0,727685	0,008628	xxx	xxx	xxx	
	25,5	2	0,004539	0,63	0,007205	0,093630	0,644410	0,007044	0,0796	0,1380	7,5178	
	6,0	25,5	3	0,005930	0,69	0,008595	0,071664	0,707190	0,008386	0,0680	0,1232	6,0225
	25,5	4	0,002243	0,12	0,018696	0,189438	0,157391	0,014254	0,0585	0,0934	3,0462	
	25,5	5	0,012348	0,74	0,016686	0,034419	0,773373	0,015966	0,0537	0,1266	5,0846	
	25,5	6	0,004730	0,74	0,006392	0,089844	0,752785	0,006284	0,0769	0,2224	17,3850	
Média					0,011069	0,091115	0,627139	0,010094	0,0673	0,1407	7,8112	
Média	38,5	1	0,002557	0,41	0,006235	0,250992	0,422471	0,006051	xxx	xxx	xxx	
	38,5	2	0,005226	0,68	0,007685	0,122781	0,695371	0,007516	0,0779	0,0535	1,1867	
	38,5	3	0,004652	0,63	0,007384	0,137928	0,644769	0,007215	0,0680	0,0757	2,3121	
	38,5	4	0,006861	0,72	0,009529	0,093526	0,739058	0,009283	0,0656	0,0904	3,1721	
	38,5	5	0,003530	0,29	0,012174	0,181753	0,314348	0,011231	0,0679	0,0894	2,8850	
	38,5	6	0,005087	0,58	0,008771	0,126140	0,597541	0,008513	0,0599	0,0732	1,9589	
Média					0,008630	0,152187	0,568926	0,008302	0,0679	0,0764	2,3030	
Média	51,0	1	0,002296	0,11	0,020870	0,370265	0,151739	0,015129	xxx	xxx	xxx	
	51,0	2	0,004583	0,15	0,030551	0,185484	0,211101	0,021708	0,0173	0,0330	0,3237	
	51,0	3	0,003313	0,14	0,023665	0,256562	0,187329	0,017686	0,0925	0,1004	2,9269	
	51,0	4	0,004609	0,17	0,026951	0,184434	0,224903	0,020492	0,0349	0,0605	1,0735	
	51,0	5	0,004765	0,19	0,025080	0,178376	0,240160	0,019842	0,0603	0,1003	2,8995	
	51,0	6	0,007635	0,53	0,014405	0,111333	0,558811	0,013663	-0,0058	xxx	xxx	
Média					0,023587	0,214409	0,262341	0,018087	0,0398	0,0735	1,8059	

Anexo B.4.- Tabela apresentando os parâmetros geométricos levantados e hidráulicos calculados, quando o canal estava na declividade de 9,0%.

	Decliv. (%)	Vazão (L.min ⁻¹)	Seção canal	Área (m ²)	Largura (m)	h Médio (m)	Vel. Media (m s ⁻¹)	Perim. Mo- lhado (m)	R. Hidrau- lico (m)	Decliv. Linha energia (m.m ⁻¹)	"n" Manning	Fator "f"
		10,0	1	0,0019652	0,31	0,006339	0,084808	0,322679	0,006090	xxx	xxx	xxx
		10,0	2	0,0048261	0,51	0,009463	0,034535	0,528926	0,009124	0,0860	0,1901	14,4158
		10,0	3	0,0021478	0,49	0,004383	0,077598	0,498767	0,004306	0,1123	0,2128	18,8215
		10,0	4	0,0006348	0,17	0,003734	0,262557	0,177468	0,003577	0,0832	0,0423	0,8892
		10,0	5	0,0007130	0,23	0,003100	0,233740	0,236200	0,003019	0,0891	0,0266	0,3742
		10,0	6	0,0042000	0,61	0,006885	0,039683	0,623770	0,006733	0,0838	0,0609	1,7153
Média				0,0024145		0,005651	0,122153	0,397968	0,005475	0,0909	0,1065	7,2432
		18,5	1	0,0041739	0,49	0,008518	0,073872	0,507036	0,008232	xxx	xxx	xxx
		18,5	2	0,0178435	0,74	0,024113	0,017280	0,788226	0,022638	0,0861	0,3992	50,2053
		18,5	3	0,0044957	0,68	0,006611	0,068585	0,693223	0,006485	0,1140	0,4689	70,6206
		18,5	4	0,0001652	0,60	0,003304	1,866228	0,056609	0,002919	xxx	xxx	xxx
		18,5	5	0,0134870	0,74	0,018226	0,022862	0,776451	0,017370	0,4399	0,0329	0,3924
		18,5	6	0,0065304	0,74	0,008825	0,047215	0,757650	0,008619	0,0760	0,4350	63,1284
Média				0,0077826		0,011600	0,349340	0,596532	0,011044	0,1790	0,3340	46,0867
		25,5	1	0,0056609	0,58	0,009760	0,075077	0,599520	0,009442	xxx	xxx	xxx
		25,5	2	0,0130000	0,74	0,017568	0,032692	0,775135	0,016771	0,0947	0,3174	33,5230
	9,0	25,5	3	0,0034348	0,51	0,006735	0,123734	0,523470	0,006562	0,0967	0,2046	14,4744
		25,5	4	0,0014000	0,12	0,011667	0,303571	0,143333	0,009767	0,0678	0,0494	0,9508
		25,5	5	0,0015304	0,10	0,015304	0,277699	0,130609	0,011718	0,1331	0,0611	1,3283
		25,5	6	0,0105739	0,68	0,015550	0,040193	0,711100	0,014870	0,0733	0,0956	3,0257
Média				0,0059333		0,012764	0,142161	0,480528	0,011522	0,0931	0,1456	10,6604
		38,5	1	0,0128348	0,74	0,017344	0,049994	0,774689	0,016568	xxx	xxx	xxx
		38,5	2	0,0042957	0,42	0,010228	0,149376	0,440455	0,009753	0,0770	0,1551	7,9976
		38,5	3	0,0028870	0,20	Falha	xxx	xxx	xxx	0,1836	0,1153	4,6659
		38,5	4	0,0016435	0,11	0,014941	0,390432	0,139881	0,011749	0,0489	0,0382	0,4978
		38,5	5	0,0007478	0,10	0,007478	0,858043	0,114957	0,006505	0,0227	0,0105	0,0416
		38,5	6	0,0044609	0,40	0,011152	0,143843	0,422304	0,010563	0,1022	0,0266	0,2726
Média				0,0044783		0,012229	0,318338	0,378457	0,011028	0,0869	0,0692	2,6951
		51,0	1	0,0061217	0,16	0,038261	0,138849	0,236522	0,025882	xxx	xxx	xxx
		51,0	2	0,0026087	0,09	0,028986	0,325833	0,147971	0,017630	0,0745	0,0916	2,3566
		51,0	3	0,0060522	0,18	0,033623	0,140445	0,247246	0,024478	0,0548	0,0766	1,6657
		51,0	4	0,0041217	0,21	0,019627	0,206224	0,249255	0,016536	0,0479	0,0946	2,5634
		51,0	5	0,0052609	0,29	0,018141	0,161570	0,326282	0,016124	0,0667	0,0904	2,5257
		51,0	6	0,0060174	0,49	0,012280	0,141257	0,514561	0,011694	0,0594	0,0931	2,8283
Média				0,0050304		0,025153	0,185697	0,286973	0,018724	0,0607	0,0892	2,3880

Anexo C

Gráficos referentes às seções transversais dos sulcos de erosão que se desenvolveram da superfície do maciço de solo após a passagem das cinco vazões crescentes e sucessivas com o canal experimental colocado nas três declividades de trabalho

Anexo C.- Seções transversais da superfície do maciço de solo após a passagem de cada vazão com o canal colocado em diferentes declividades

Anexo C.1.- Gráficos apresentando as seções de número 3, 4 e 5 após a passagem da vazão de $10,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de 3,0%.

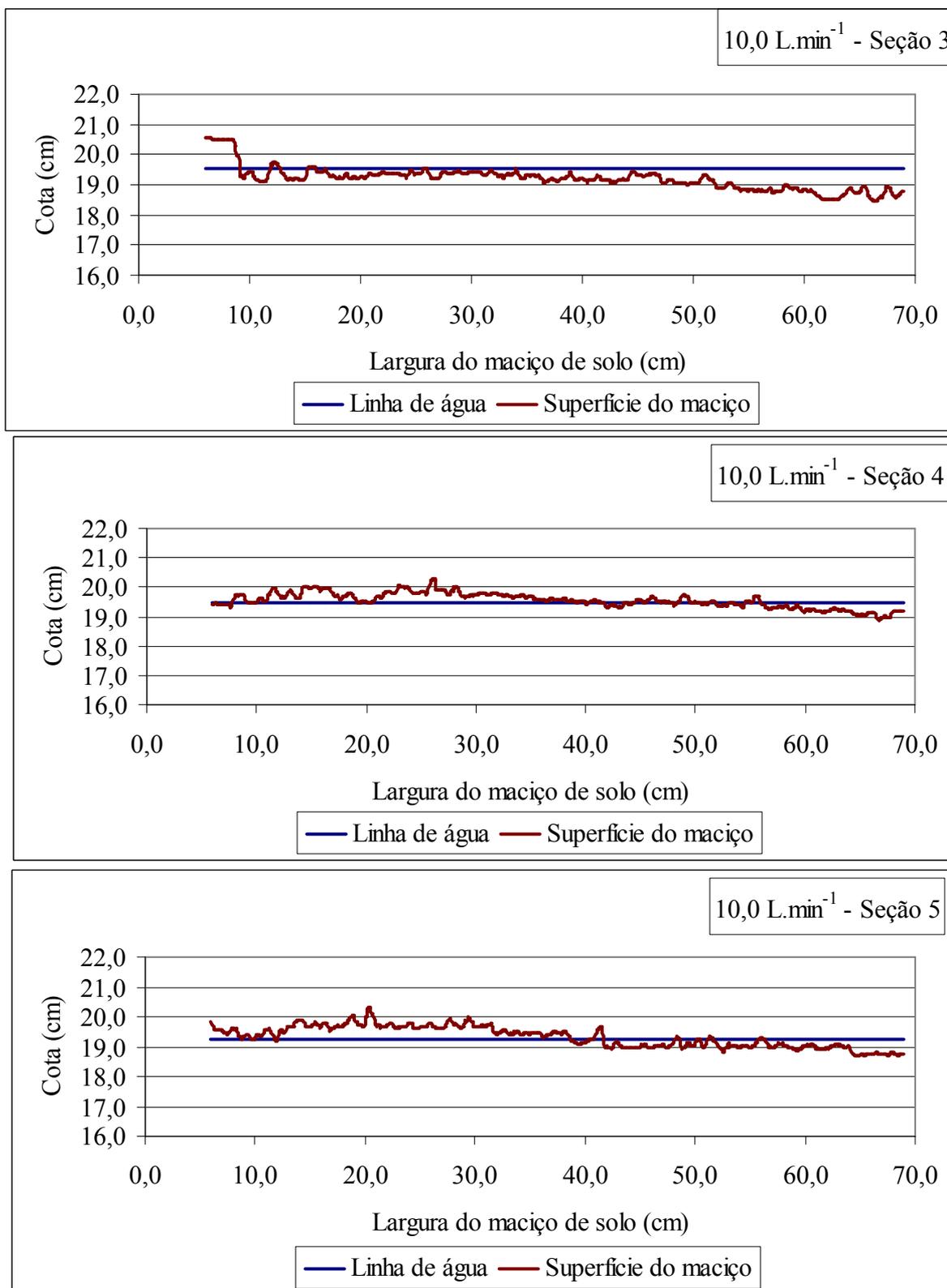


Figura C1.- Posição do fundo (superfície do maciço de solo) e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem da vazão de $10,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal colocado na declividade de 3,0%.

Anexo C.2.- Gráficos apresentando as seções de número 3, 4 e 5 após a passagem da vazão de $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de $3,0\%$.

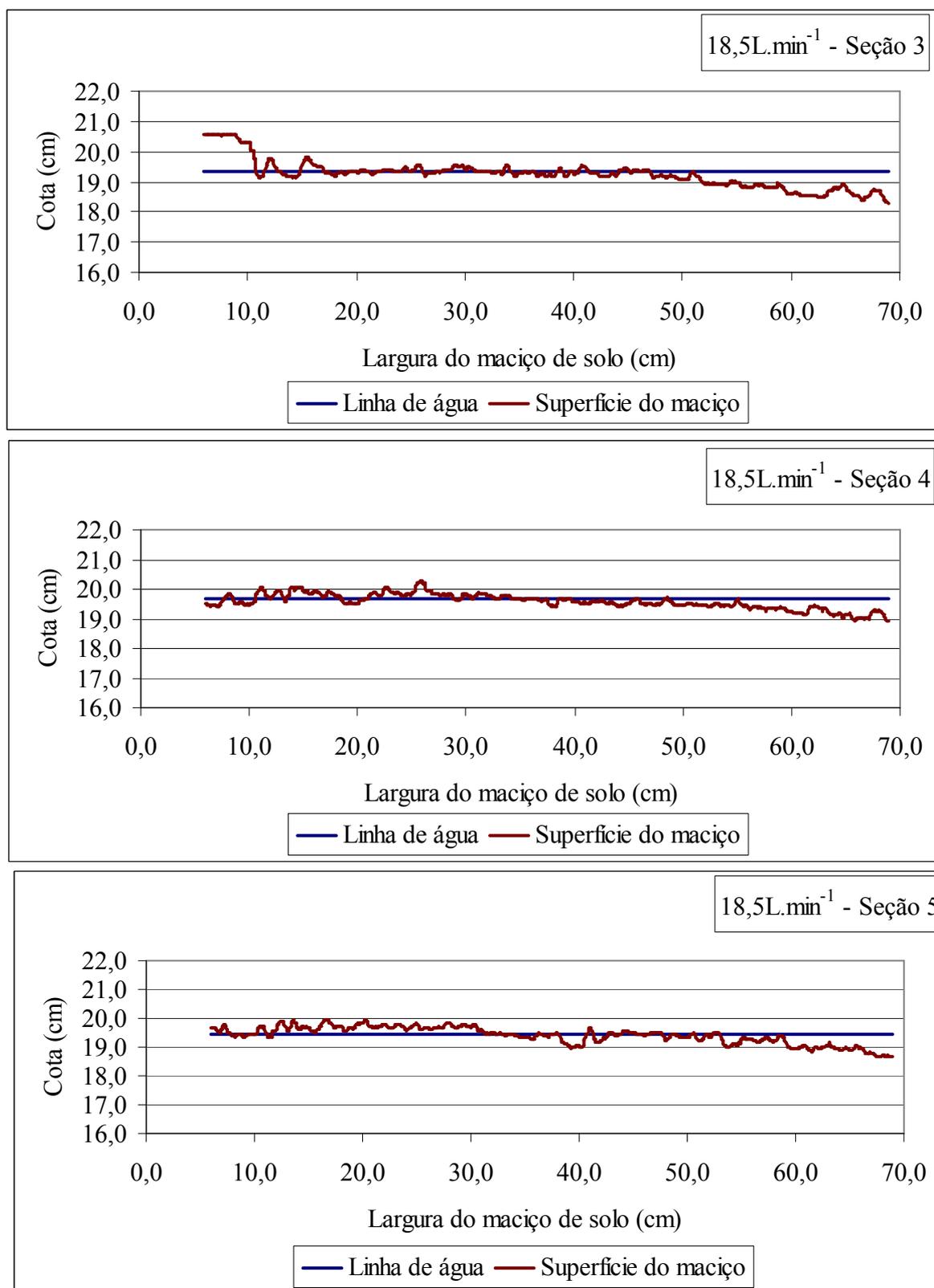


Figura C2.- Posição do fundo (superfície do maciço de solo) e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem da vazão de $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal colocado na declividade de $3,0\%$.

Anexo C.3.- Gráficos apresentando as seções de número 3, 4 e 5 após a passagem da vazão de $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de $3,0\%$.

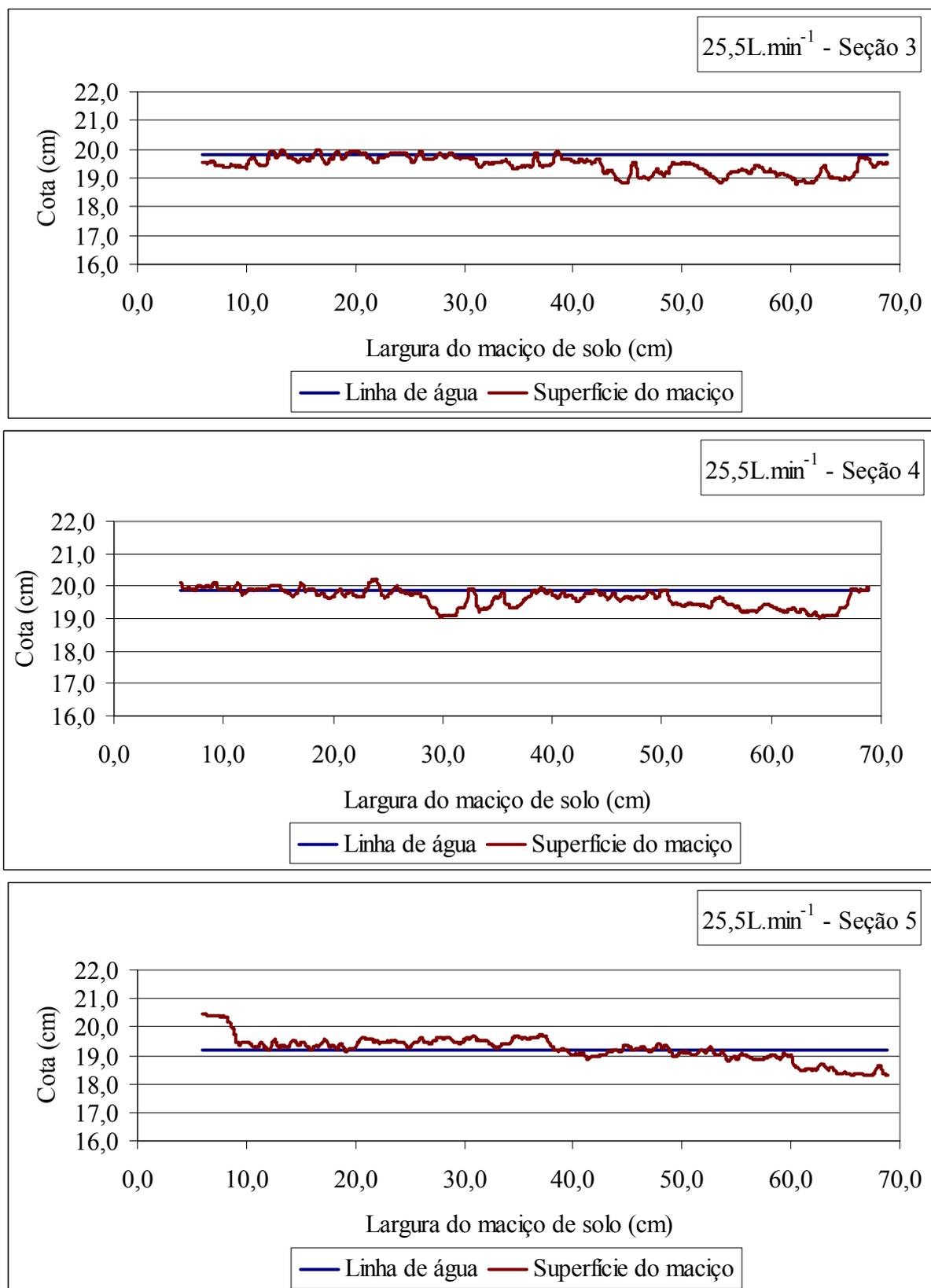


Figura C3.- Posição do fundo (superfície do maciço de solo) e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem da vazão de $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal colocado na declividade de $3,0\%$.

Anexo C.4.- Gráficos apresentando as seções de número 3, 4 e 5 após a passagem da vazão de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de $3,0\%$.

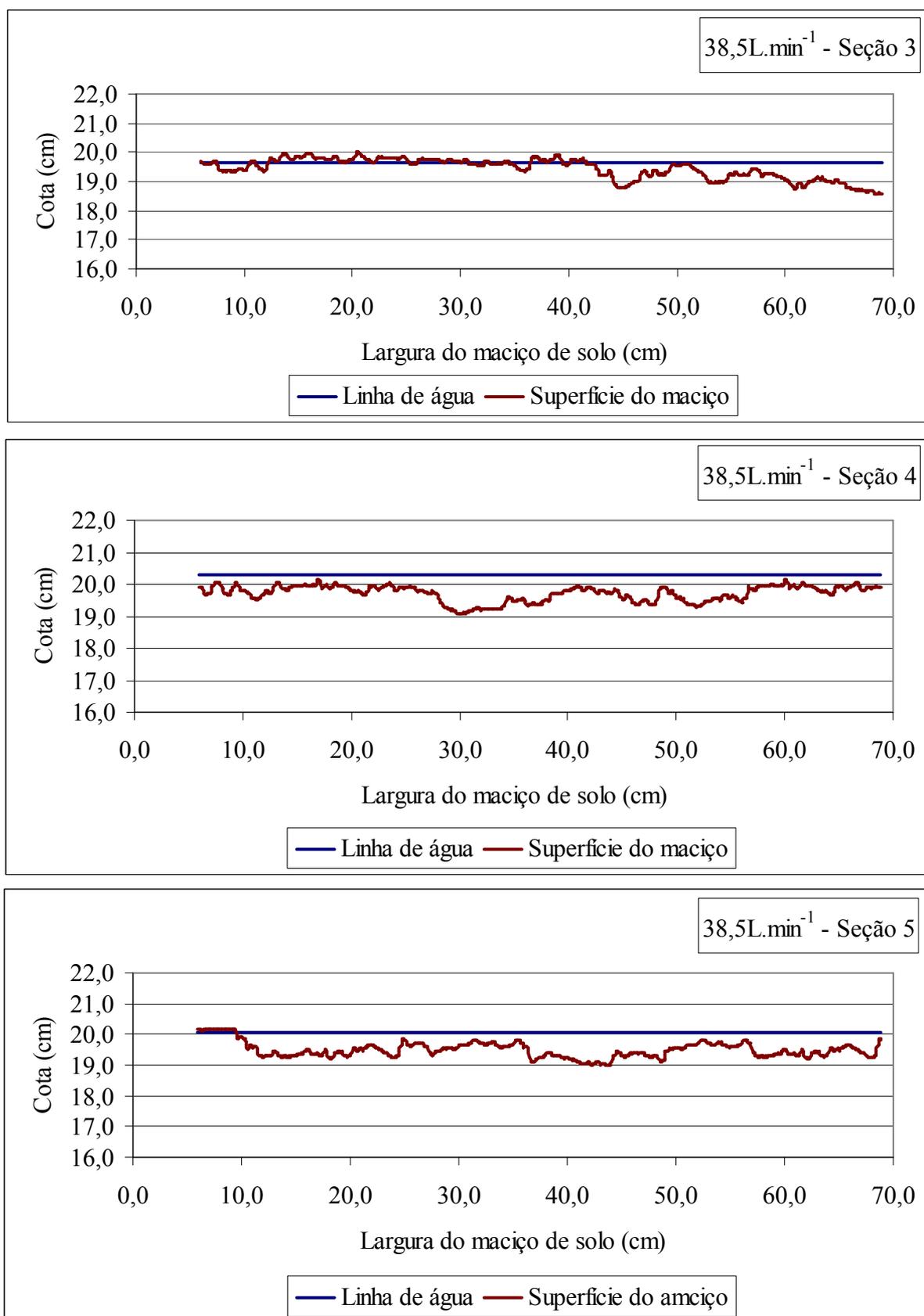


Figura C4.- Posição do fundo (superfície do maciço de solo) e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem da vazão de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal colocado na declividade de $3,0\%$.

Anexo C.5.- Gráficos apresentando as seções de número 3, 4 e 5 após a passagem da vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de 3,0%.

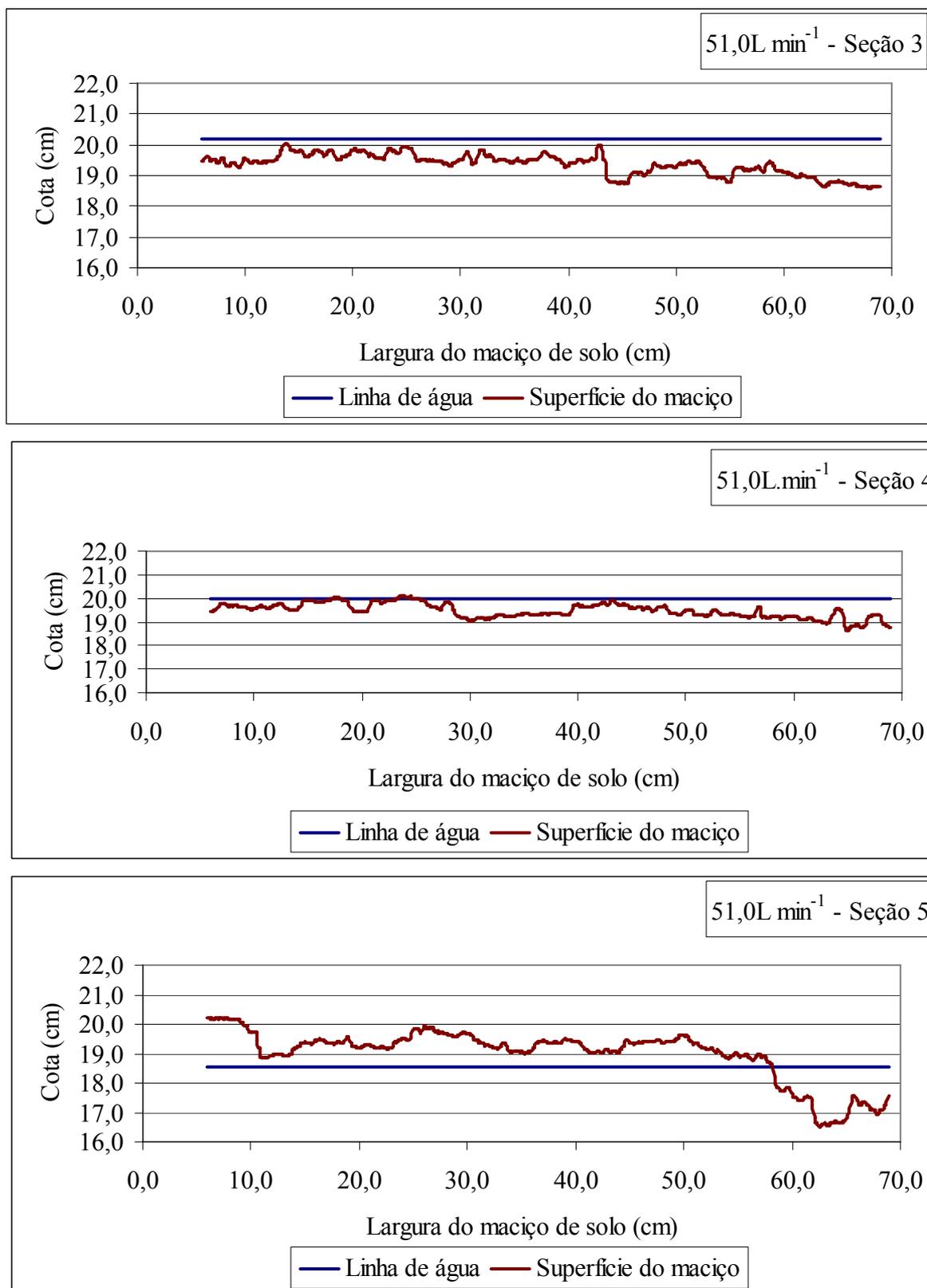


Figura C5.- Posição do fundo (superfície do maciço de solo) e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem da vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal colocado na declividade de 3,0%.

Anexo C.6.- Gráficos apresentando as seções de número 2, 4 e 5 após a passagem da vazão de $10,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de $6,0\%$.

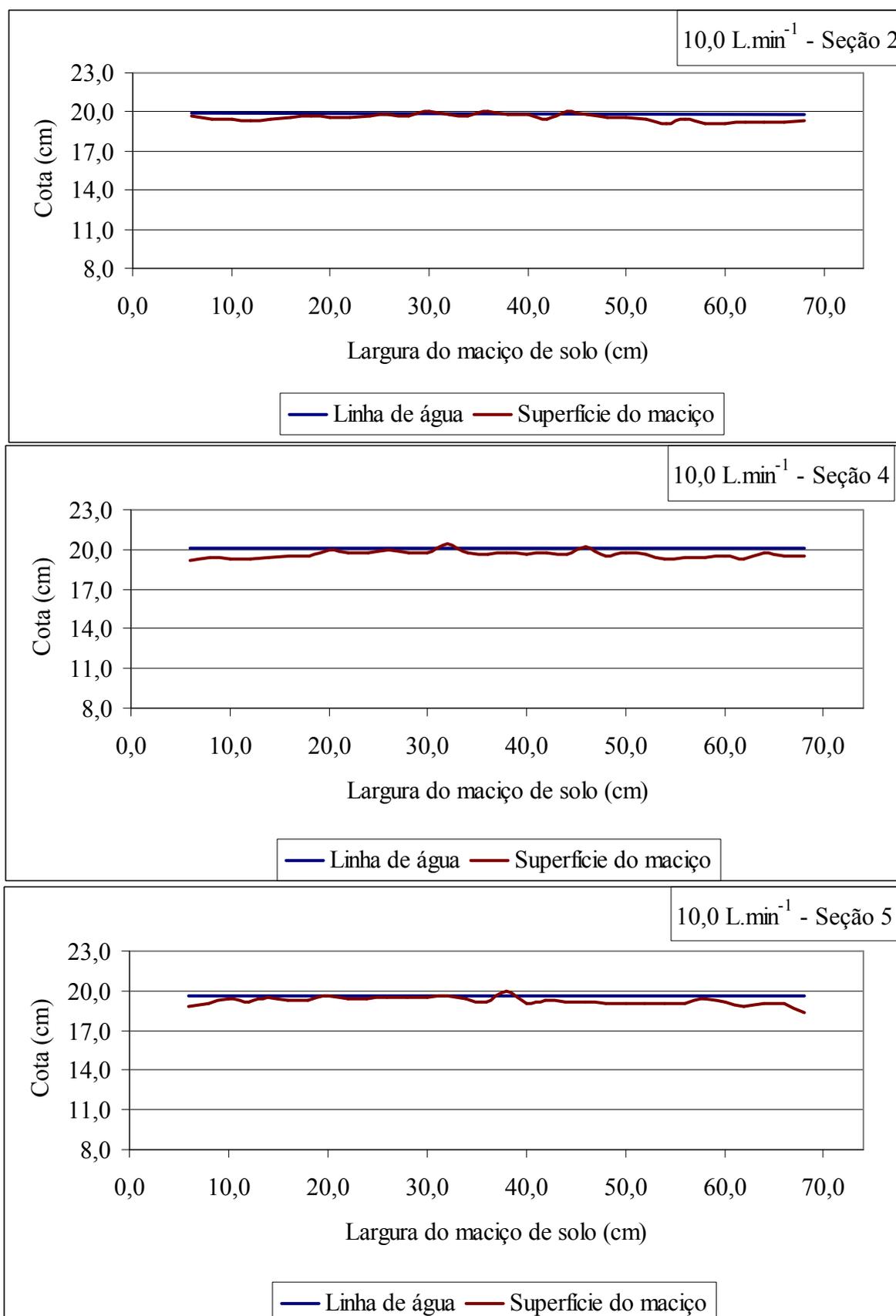


Figura C6.- Posição da superfície do maciço de solo e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem das vazões crescentes e sucessivas sobre o maciço de solo.

Anexo C.7.- Gráficos apresentando as seções de número 2, 4 e 5 após a passagem da vazão de $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de $6,0\%$.

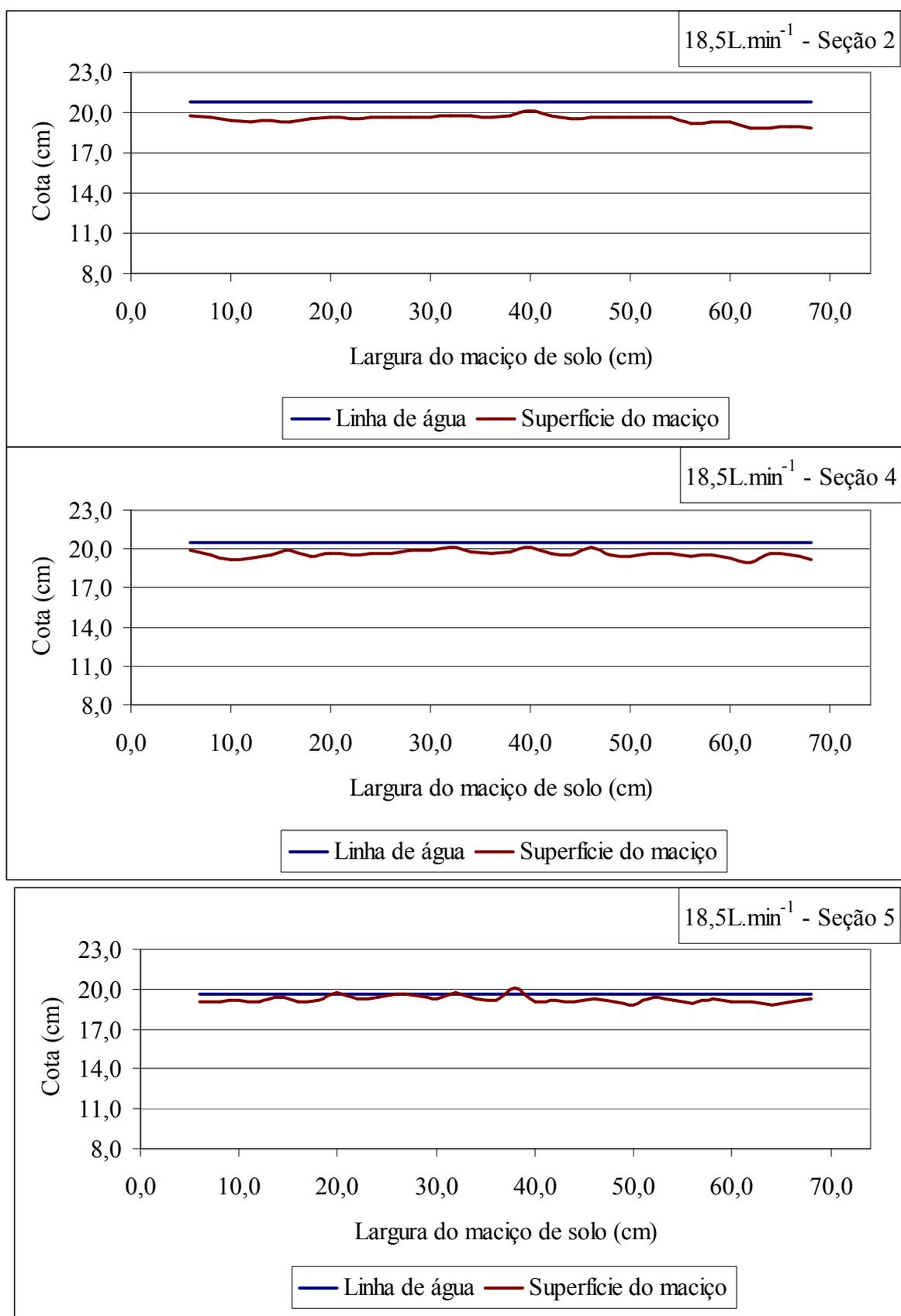


Figura C7.- Posição da superfície do maciço de solo e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem das vazões crescentes e sucessivas sobre o maciço de solo.

Anexo C.8.- Gráficos apresentando as seções de número 2, 4 e 5 após a passagem da vazão de $25,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de $6,0\%$.

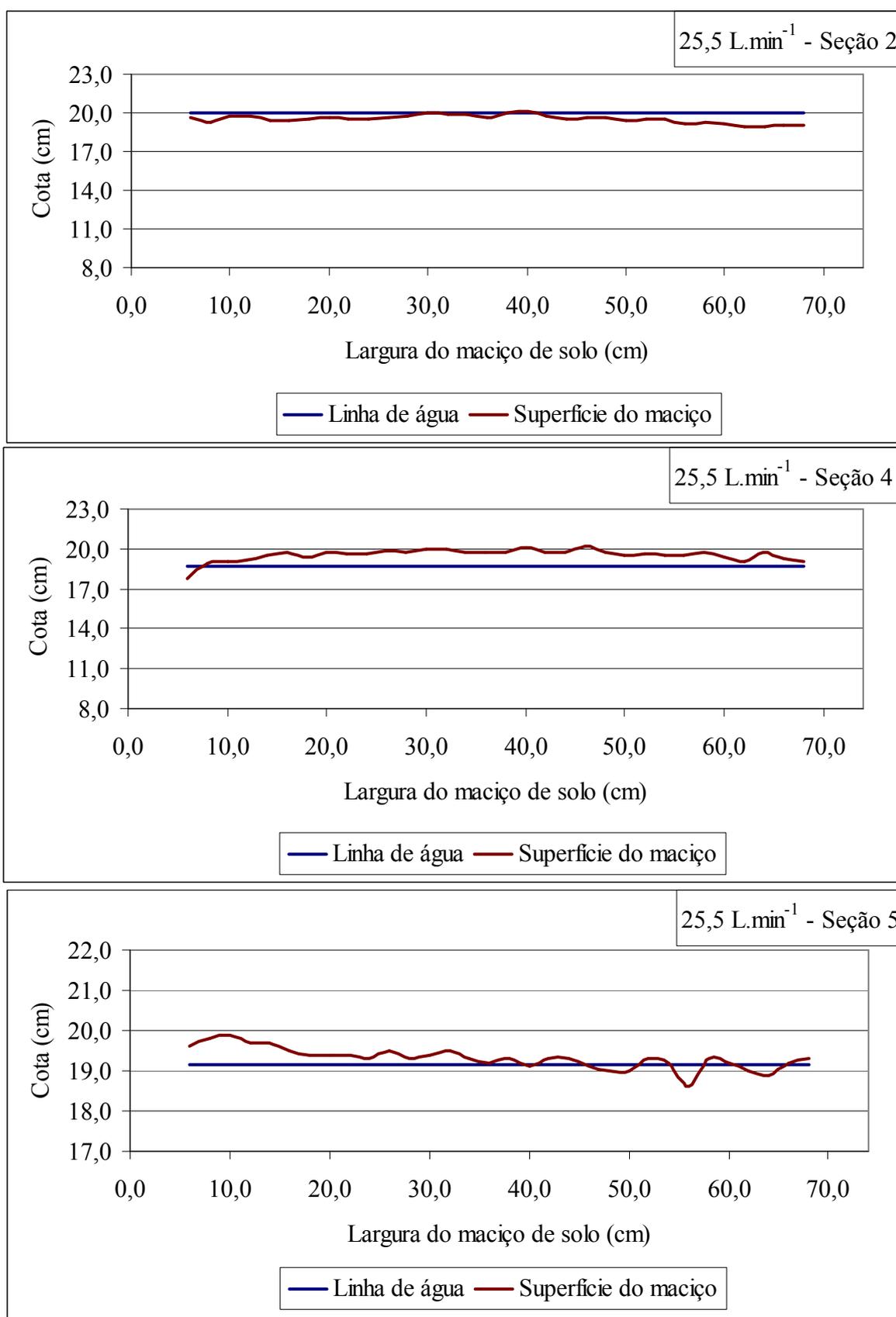


Figura C8.- Posição da superfície do maciço de solo e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem das vazões crescentes e sucessivas sobre o maciço de solo.

Anexo C.9.- Gráficos apresentando as seções de número 2, 4 e 5 após a passagem da vazão de $38,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de $6,0\%$.

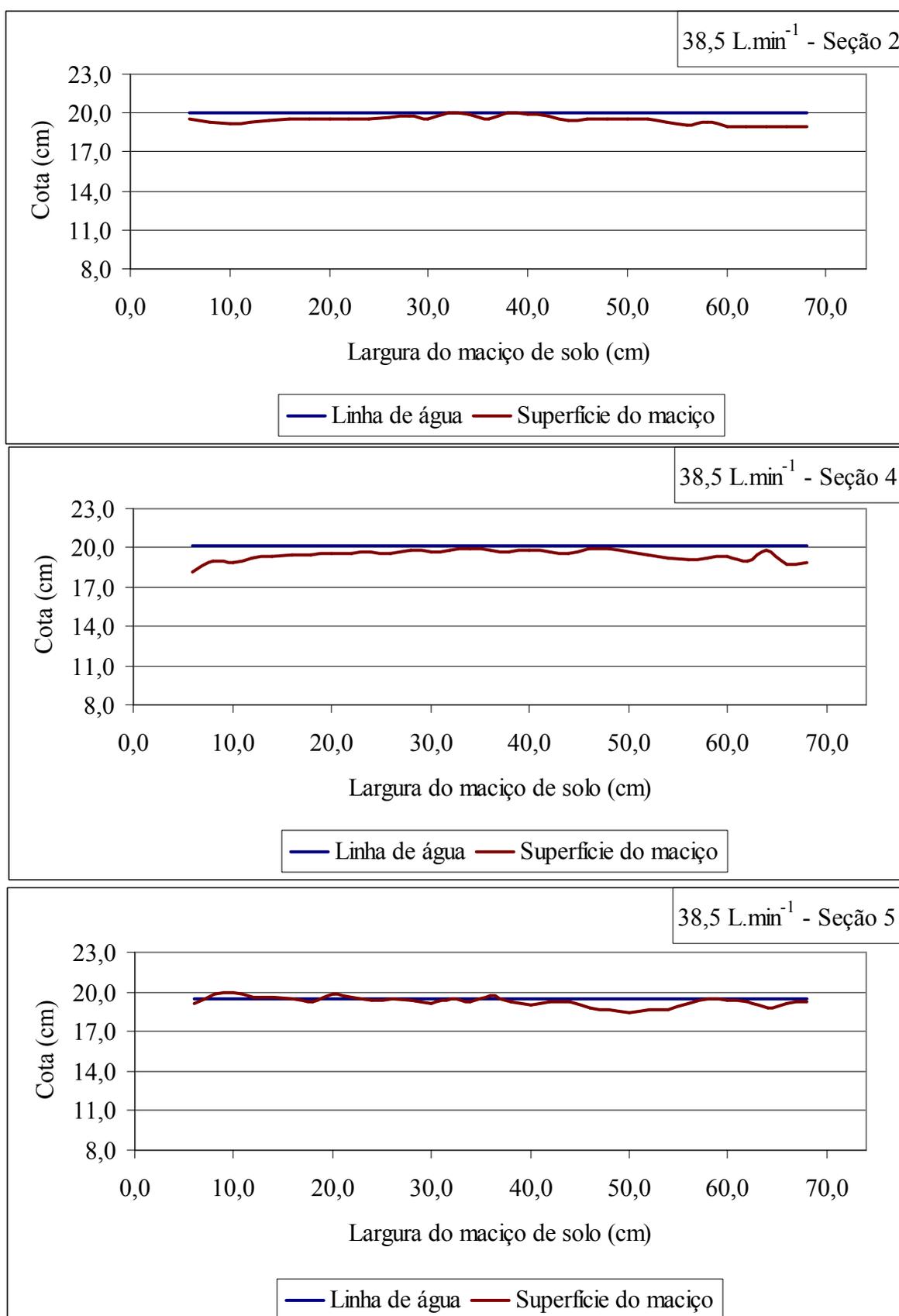


Figura C9.- Posição da superfície do maciço de solo e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem das vazões crescentes e sucessivas sobre o maciço de solo.

Anexo C.10.- Gráficos apresentando as seções de número 2, 4 e 5 após a passagem da vazão de $51,0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de $6,0\%$.

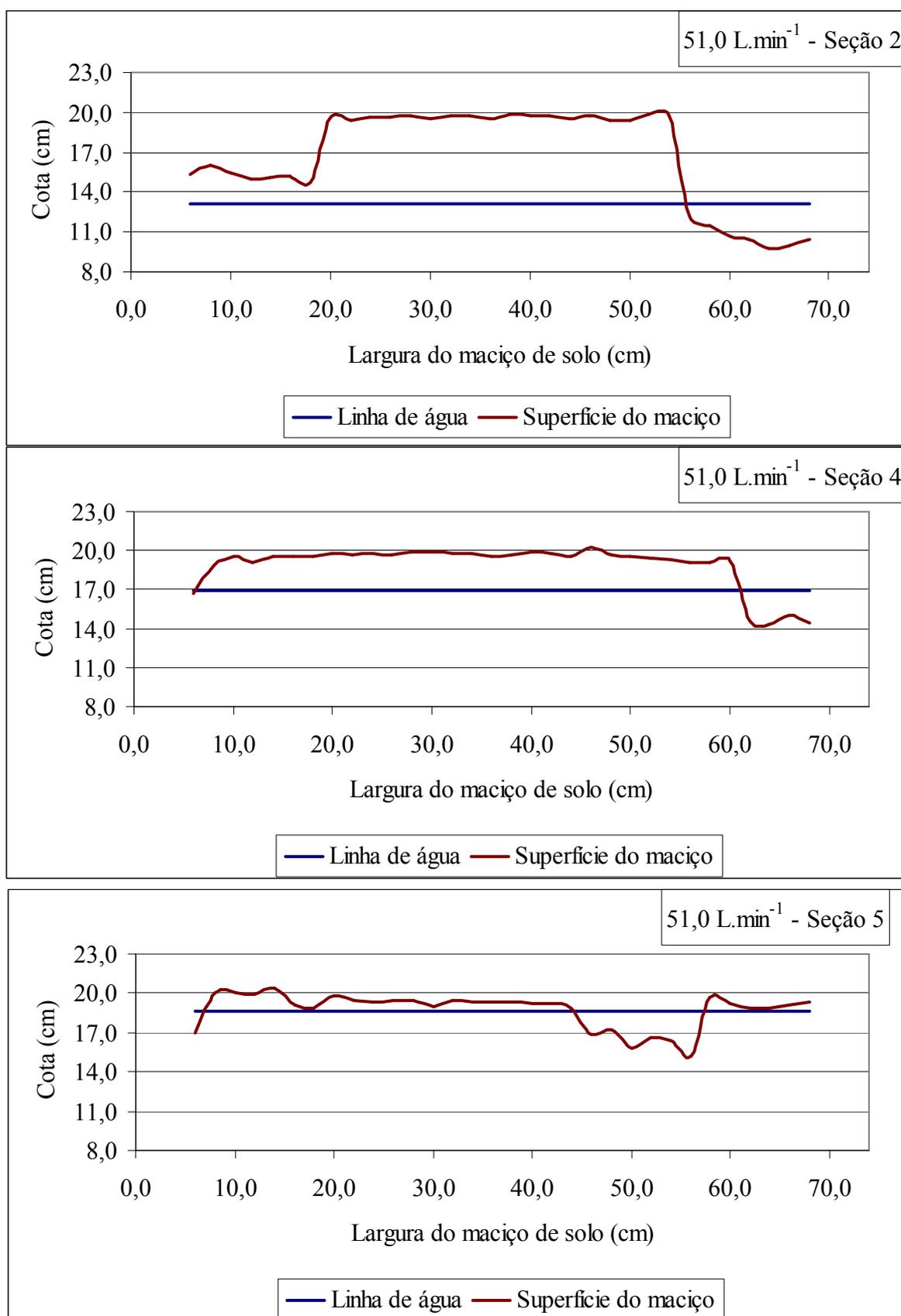


Figura C10.- Posição da superfície do maciço de solo e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem das vazões crescentes e sucessivas sobre o maciço de solo.

Anexo C.11.- Gráficos apresentando as seções de número 2, 4 e 5 após a passagem da vazão de $10,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de $9,0\%$.

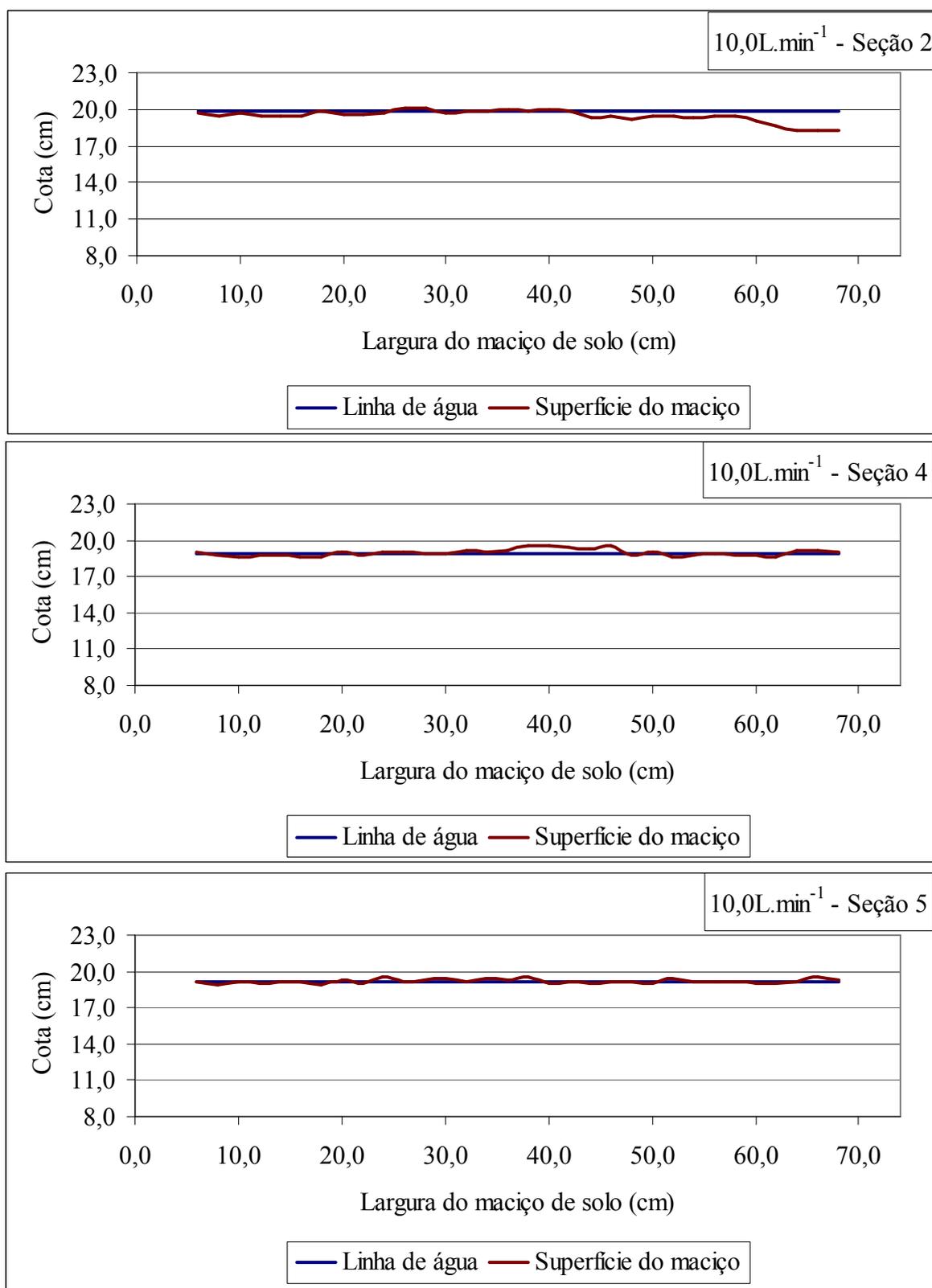


Figura C11.- Posição da superfície do maciço de solo e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem das vazões crescentes e sucessivas sobre o maciço de solo.

Anexo C.12.- Gráficos apresentando as seções de número 2, 4 e 5 após a passagem da vazão de $18,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de $9,0\%$.

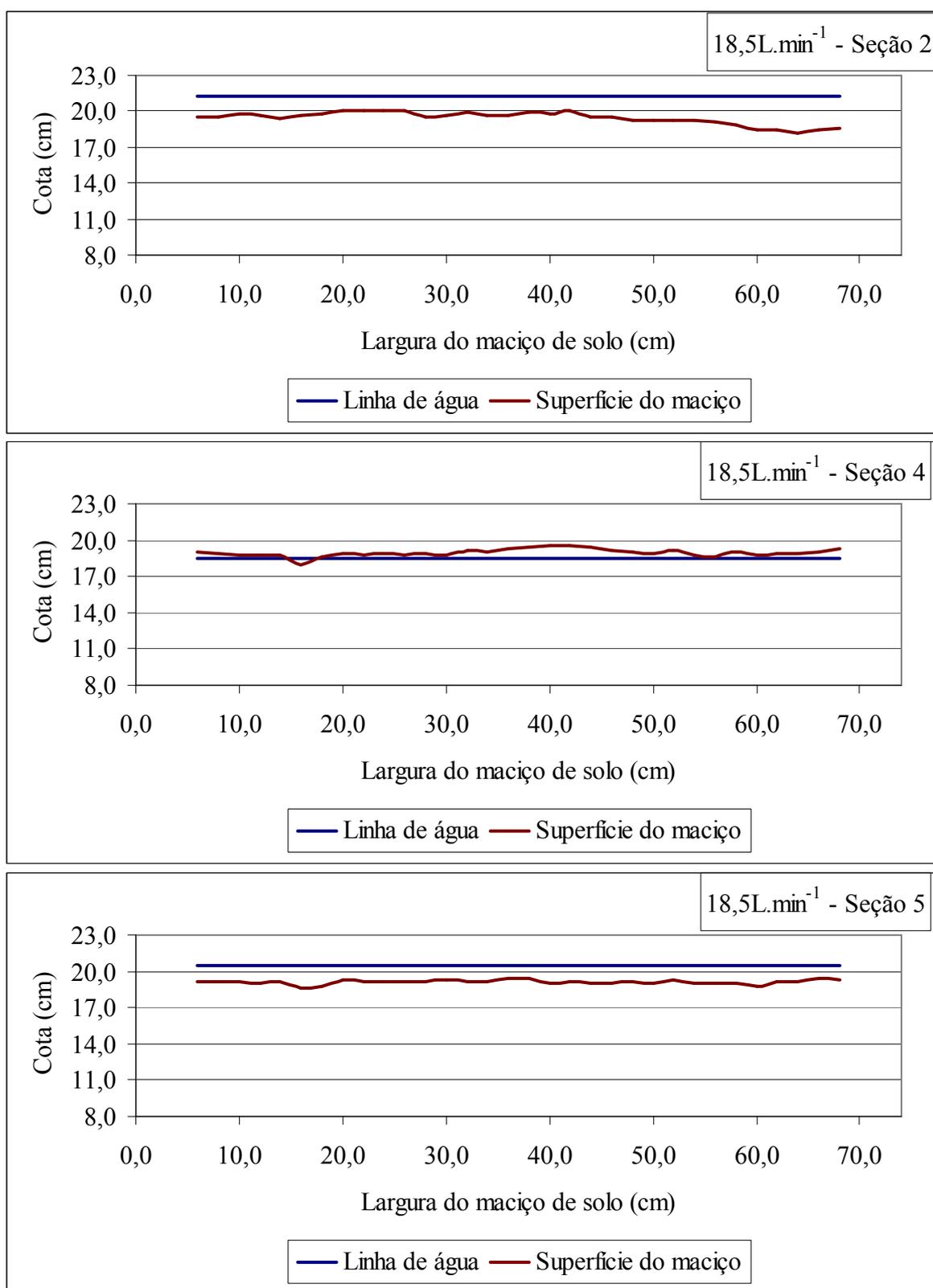


Figura C12.- Posição da superfície do maciço de solo e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem das vazões crescentes e sucessivas sobre o maciço de solo.

Anexo C.13.- Gráficos apresentando as seções de número 2, 4 e 5 após a passagem da vazão de $25,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de $9,0\%$.

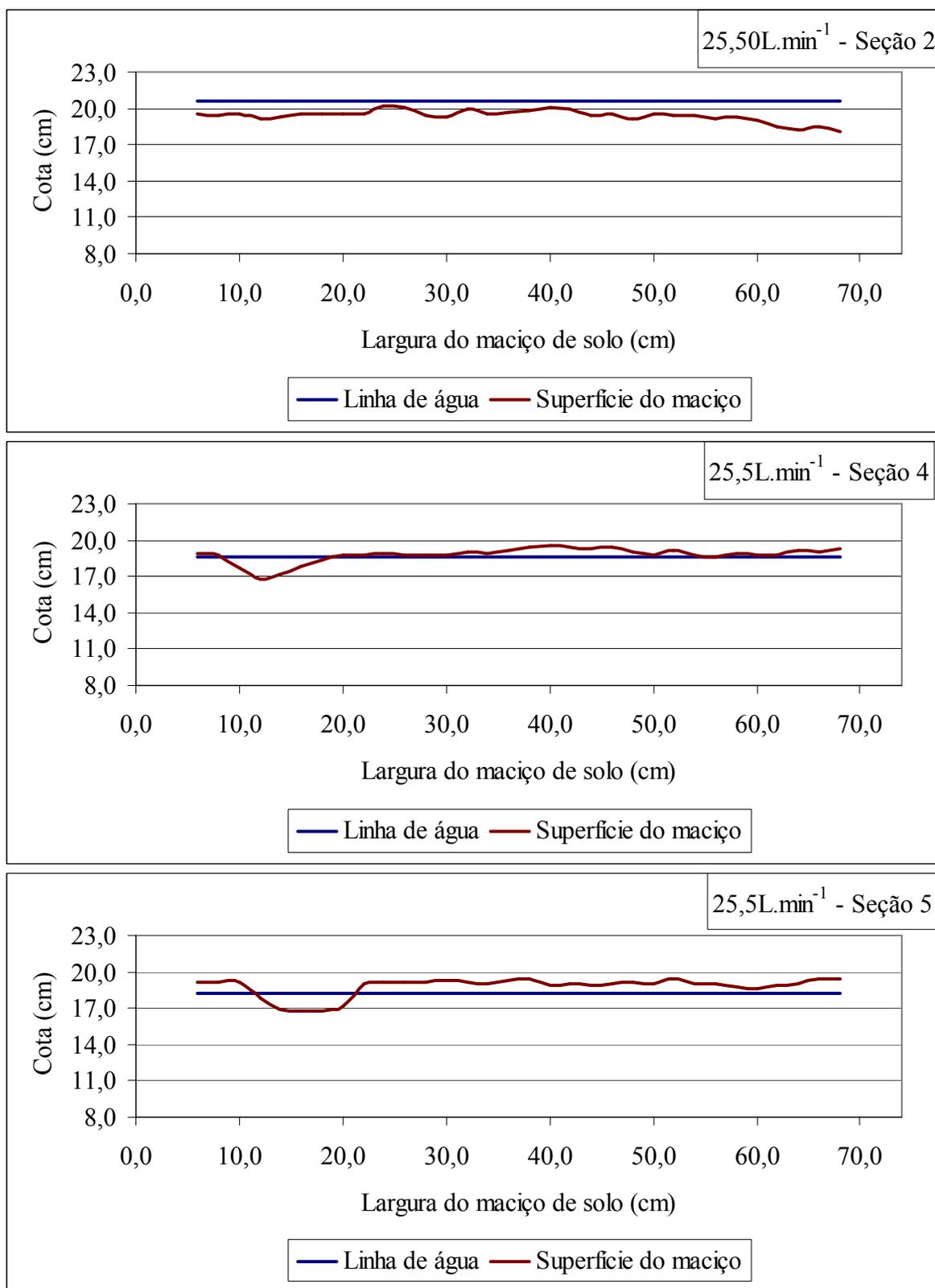


Figura C13.- Posição da superfície do maciço de solo e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem das vazões crescentes e sucessivas sobre o maciço de solo.

Anexo C.14.- Gráficos apresentando as seções de número 2, 4 e 5 após a passagem da vazão de $38,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de $9,0\%$.

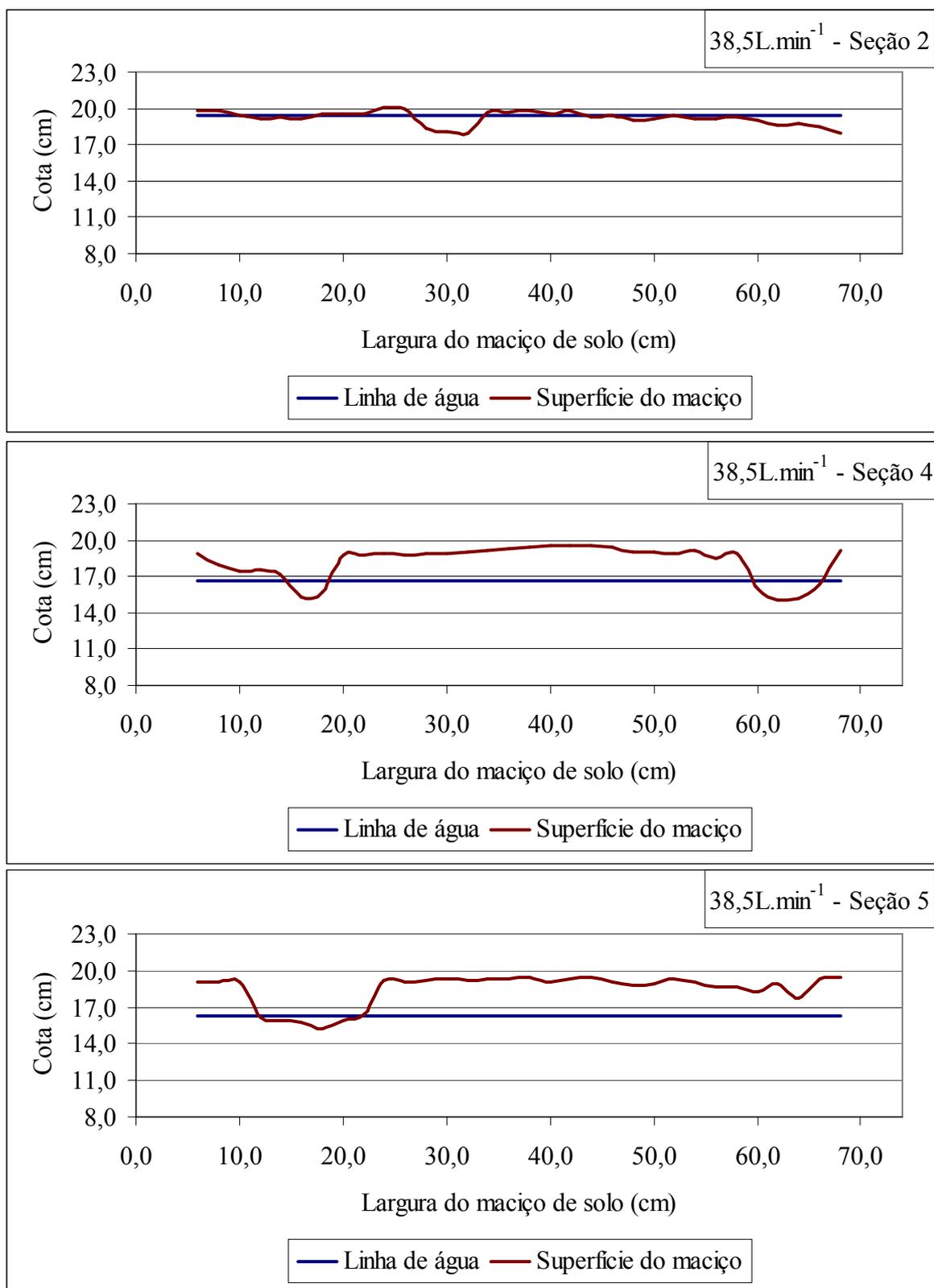


Figura C14.- Posição da superfície do maciço de solo e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem das vazões crescentes e sucessivas sobre o maciço de solo.

Anexo C.15.- Gráficos apresentando as seções de número 2, 4 e 5 após a passagem da vazão de $51,0\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ com o canal na declividade de $9,0\%$.

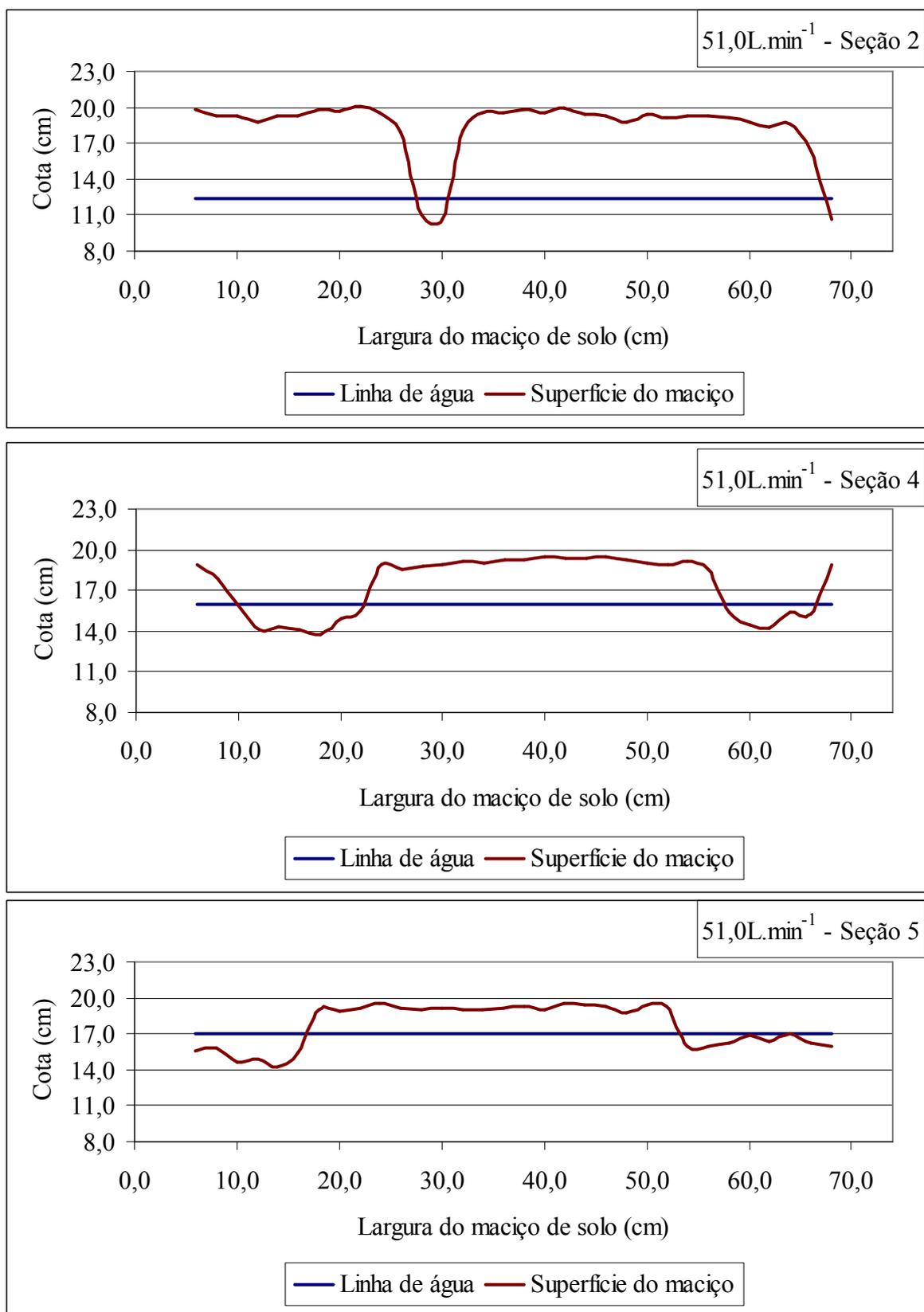


Figura C15.- Posição da superfície do maciço de solo e da linha de água em diferentes seções de avaliação, após a passagem das vazões crescentes e sucessivas sobre o maciço de solo.

Anexo D

Dados referentes à concentração de partículas sólidas no escoamento obtidos no decorrer de cada um dos eventos ensaiados no canal experimental para as três declividades de trabalho

Anexo D – Concentração de partículas sólidas no escoamento superficial

Anexo D.1.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 3,0 %;
 Vazão: 10,0 L.min⁻¹;
 Perímetro molhado: 0,73 m; e
 Comprimento médio do sulco: 3,50 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
5	5	1,61E-05	7,69E-07	1,05E-06	8,07E-04
10	5	2,45E-05	1,17E-06	1,60E-06	1,23E-03
20	5	1,64E-05	7,81E-07	1,07E-06	1,64E-03
30	5	2,85E-05	1,36E-06	1,86E-06	2,85E-03
40	5	2,78E-05	1,32E-06	1,81E-06	2,78E-03
50	5	2,75E-05	1,31E-06	1,79E-06	2,75E-03
60	5	3,03E-05	1,44E-06	1,98E-06	3,03E-03
					1,51E-02
G =	5,74E-06	kg m ⁻¹ s ⁻¹			

Anexo D.2.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 3,0 %;

Vazão: 18,5 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,73 m; e

Comprimento médio do sulco: 3,50 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
4	3	2,90E-05	2,56E-06	3,50E-06	2,15E-03
10	3	2,62E-05	2,31E-06	3,16E-06	2,91E-03
15	3	2,81E-05	2,47E-06	3,39E-06	2,60E-03
20	3	2,91E-05	2,56E-06	3,51E-06	2,69E-03
25	3	2,97E-05	2,62E-06	3,58E-06	2,75E-03
30	3	2,66E-05	2,34E-06	3,21E-06	2,46E-03
40	3	2,83E-05	2,49E-06	3,41E-06	5,23E-03
60	3	2,05E-05	1,80E-06	2,47E-06	7,58E-03
					2,84E-02
G =	1,08E-05	kg m ⁻¹ s ⁻¹			

Anexo D.3.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 3,0 %;

Vazão: 25,5 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,73 m; e

Comprimento médio do sulco: 3,50 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
1	2	4,33E-05	5,26E-06	7,21E-06	1,11E-03
5	2	4,10E-05	4,98E-06	6,82E-06	4,18E-03
10	2	2,92E-05	3,54E-06	4,85E-06	3,72E-03
15	2	2,41E-05	2,93E-06	4,02E-06	3,08E-03
20	2	1,91E-05	2,31E-06	3,17E-06	2,43E-03
40	2	2,30E-05	2,80E-06	3,83E-06	1,17E-02
60	2	1,92E-05	2,33E-06	3,20E-06	9,80E-03
G =	1,37E-05	kg m ⁻¹ s ⁻¹			3,61E-02

Anexo D.4.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 3,0 %;

Vazão: 38,5 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,70 m; e

Comprimento médio do sulco: 3,50 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
1	1	1,03E-04	1,90E-05	2,72E-05	3,98E-03
5	1	7,65E-05	1,40E-05	2,01E-05	1,18E-02
10	1	7,70E-05	1,41E-05	2,03E-05	1,48E-02
15	1	6,21E-05	1,14E-05	1,63E-05	1,20E-02
25	1	4,43E-05	8,12E-06	1,17E-05	8,53E-03
30	1	5,22E-05	9,57E-06	1,37E-05	1,00E-02
45	1	4,24E-05	7,77E-06	1,11E-05	2,45E-02
60	1	6,22E-05	1,14E-05	1,64E-05	3,59E-02
75	1	4,54E-05	8,32E-06	1,19E-05	2,62E-02
					1,48E-01
G =	4,71E-05	kg m ⁻¹ s ⁻¹			

Anexo D.5.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 3,0 %;

Vazão: 51,0 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,69 m; e

Comprimento médio do sulco: 0,52 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
1	1	1,23E-04	2,03E-04	2,95E-04	6,35E-03
5	1	7,69E-05	1,27E-04	1,84E-04	1,58E-02
10	1	6,21E-05	1,02E-04	1,49E-04	1,60E-02
25	1	4,90E-05	8,09E-05	1,17E-04	3,79E-02
40	1	6,39E-05	1,05E-04	1,53E-04	4,93E-02
60	1	1,55E-04	2,56E-04	3,72E-04	1,60E-01
75	1	1,49E-04	2,46E-04	3,57E-04	1,15E-01
90	1	1,61E-04	2,66E-04	3,86E-04	1,25E-01
					5,25E-01
G =	1,41E-04	kg m ⁻¹ s ⁻¹			

Anexo D.6.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 6,0 %;

Vazão: 10,0 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,67 m; e

Comprimento médio do sulco: 3,50 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
5	10	5,20E-05	2,48E-06	3,71E-06	2,60E-03
10	10	4,38E-05	2,09E-06	3,13E-06	2,19E-03
15	10	3,81E-05	1,81E-06	2,72E-06	1,90E-03
20	8	4,00E-05	1,91E-06	2,86E-06	2,00E-03
25	8	4,74E-05	2,26E-06	3,38E-06	2,37E-03
30	8	4,10E-05	1,95E-06	2,93E-06	2,05E-03
35	8	4,75E-05	2,26E-06	3,39E-06	2,37E-03
40	8	5,40E-05	2,57E-06	3,86E-06	2,70E-03
45	8	4,78E-05	2,28E-06	3,41E-06	2,39E-03
50	8	5,35E-05	2,55E-06	3,82E-06	2,68E-03
55	8	3,96E-05	1,89E-06	2,83E-06	1,98E-03
60	8	5,02E-05	2,39E-06	3,59E-06	2,51E-03
					2,78E-02
G =	1,16E-05	kg m ⁻¹ s ⁻¹			

Anexo D.7.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 6,0 %;

Vazão: 18,5 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,69 m; e

Comprimento médio do sulco: 3,50 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
2	3	3,67E-05	3,23E-06	4,65E-06	1,36E-03
5	3	2,69E-05	2,37E-06	3,42E-06	1,50E-03
10	3	3,55E-05	3,13E-06	4,50E-06	3,28E-03
15	3	3,67E-05	3,23E-06	4,65E-06	3,39E-03
20	3	3,75E-05	3,30E-06	4,75E-06	3,47E-03
25	3	2,60E-05	2,29E-06	3,29E-06	2,40E-03
30	3	2,36E-05	2,08E-06	2,99E-06	2,18E-03
35	3	2,55E-05	2,24E-06	3,23E-06	2,36E-03
40	3	2,45E-05	2,16E-06	3,10E-06	2,26E-03
45	3	2,72E-05	2,40E-06	3,45E-06	2,52E-03
50	3	2,94E-05	2,59E-06	3,73E-06	2,72E-03
55	3	2,75E-05	2,43E-06	3,49E-06	2,55E-03
60	3	2,94E-05	2,59E-06	3,73E-06	2,72E-03
					3,27E-02
G =	1,31E-05	kg m ⁻¹ s ⁻¹			

Anexo D.8.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 6,0 %;

Vazão: 25,5 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,63 m; e

Comprimento médio do sulco: 2,16 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
2	2	7,13E-05	1,40E-05	2,24E-05	3,64E-03
5	2	5,86E-05	1,15E-05	1,84E-05	4,49E-03
10	2	3,38E-05	6,65E-06	1,06E-05	4,31E-03
15	2	3,88E-05	7,63E-06	1,22E-05	4,95E-03
20	2	1,32E-05	2,60E-06	4,15E-06	1,69E-03
25	2	1,23E-05	2,43E-06	3,87E-06	1,57E-03
30	2	4,44E-06	8,73E-07	1,39E-06	5,66E-04
35	2	5,06E-06	9,95E-07	1,59E-06	6,45E-04
40	2	2,93E-05	5,77E-06	9,20E-06	3,74E-03
45	2	3,13E-05	6,16E-06	9,82E-06	3,99E-03
50	2	3,48E-05	6,85E-06	1,09E-05	4,44E-03
55	2	3,51E-05	6,91E-06	1,10E-05	4,48E-03
60	2	3,18E-05	6,25E-06	9,97E-06	4,05E-03
					4,25E-02
G =	1,88E-05	kg m ⁻¹ s ⁻¹			

Anexo D.9.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 6,0 %;

Vazão: 38,5 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,57 m; e

Comprimento médio do sulco: 2,16 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
1	1	1,65E-04	4,90E-05	8,62E-05	6,36E-03
3	1	1,52E-04	4,51E-05	7,93E-05	1,17E-02
6	1	1,57E-04	4,65E-05	8,18E-05	1,81E-02
9	1	1,09E-04	3,25E-05	5,71E-05	1,26E-02
12	1	1,10E-04	3,26E-05	5,73E-05	1,27E-02
15	1	7,63E-05	2,27E-05	3,98E-05	8,81E-03
18	1	6,94E-05	2,06E-05	3,63E-05	8,02E-03
21	1	6,55E-05	1,95E-05	3,42E-05	7,56E-03
24	1	5,44E-05	1,62E-05	2,84E-05	6,29E-03
27	1	6,70E-05	1,99E-05	3,50E-05	7,74E-03
30	1	1,02E-04	3,02E-05	5,30E-05	1,17E-02
35	1	1,01E-04	3,00E-05	5,27E-05	1,94E-02
40	1	1,03E-04	3,07E-05	5,39E-05	1,99E-02
43	1	1,51E-04	4,48E-05	7,87E-05	1,74E-02
46	1	6,63E-05	1,97E-05	3,46E-05	7,65E-03
49	1	6,56E-05	1,95E-05	3,43E-05	7,58E-03
51	1	8,52E-05	2,53E-05	4,45E-05	9,84E-03
54	1	1,35E-04	4,02E-05	7,07E-05	1,56E-02
57	1	8,66E-05	2,57E-05	4,52E-05	1,00E-02
60	1	7,56E-05	2,25E-05	3,95E-05	8,74E-03
63	1	7,42E-05	2,20E-05	3,87E-05	8,57E-03
68	1	1,10E-04	3,26E-05	5,72E-05	2,11E-02
73	1	9,66E-05	2,87E-05	5,04E-05	1,86E-02
75	1	1,09E-04	3,23E-05	5,67E-05	8,37E-03
					2,84E-01

$$G = 1,11E-04 \quad \text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Anexo D10.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 6,0 %;

Vazão: 51,0 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,26 m; e

Comprimento médio do sulco: 2,16 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C^{in} (kg l ⁻¹)	Er kg m ⁻¹ s ⁻¹	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
20 "	1	1,87E-03	7,41E-04	2,83E-03	3,20E-02
1	1	2,56E-03	1,02E-03	3,88E-03	8,79E-02
2	1	2,31E-03	9,19E-04	3,51E-03	1,19E-01
3	1	2,84E-03	1,13E-03	4,31E-03	1,46E-01
4	1	2,66E-03	1,06E-03	4,04E-03	1,37E-01
5	1	2,80E-03	1,11E-03	4,25E-03	1,44E-01
6	1	2,42E-03	9,62E-04	3,67E-03	1,25E-01
7	1	2,52E-03	1,00E-03	3,83E-03	1,30E-01
8	1	2,98E-03	1,18E-03	4,52E-03	1,53E-01
9	1	2,09E-03	8,29E-04	3,16E-03	1,07E-01
10	1	2,58E-03	1,02E-03	3,91E-03	1,33E-01
11	1	3,62E-03	1,44E-03	5,49E-03	1,86E-01
13	1	4,58E-03	1,82E-03	6,94E-03	4,71E-01
15	1	4,95E-03	1,97E-03	7,51E-03	5,10E-01
17	1	6,46E-03	2,57E-03	9,80E-03	6,65E-01
19	1	8,38E-03	3,33E-03	1,27E-02	8,63E-01
20	1	8,00E-03	3,18E-03	1,21E-02	4,12E-01
22	1	7,55E-03	3,00E-03	1,14E-02	7,77E-01
24	1	9,72E-03	3,86E-03	1,47E-02	1,00E+00
26	1	5,89E-03	2,34E-03	8,94E-03	6,07E-01
28	1	4,90E-03	1,95E-03	7,43E-03	5,04E-01
30	1	4,97E-03	1,98E-03	7,54E-03	5,12E-01
32	1	3,40E-03	1,35E-03	5,15E-03	3,50E-01
34	1	1,36E-02	5,39E-03	2,06E-02	1,40E+00
36	1	9,01E-03	3,58E-03	1,37E-02	9,28E-01
38	1	6,48E-03	2,58E-03	9,84E-03	6,68E-01
40	1	4,63E-03	1,84E-03	7,03E-03	4,77E-01
42	1	2,55E-03	1,01E-03	3,87E-03	2,63E-01
44	1	1,94E-03	7,69E-04	2,94E-03	1,99E-01
46	1	1,49E-03	5,93E-04	2,26E-03	1,54E-01
48	1	1,79E-03	7,12E-04	2,72E-03	1,85E-01
50	1	1,25E-03	4,95E-04	1,89E-03	1,28E-01
52	1	1,07E-03	4,24E-04	1,62E-03	1,10E-01
54	1	9,78E-04	3,89E-04	1,48E-03	1,01E-01
56	1	9,86E-04	3,92E-04	1,50E-03	1,02E-01
58	1	8,77E-04	3,48E-04	1,33E-03	9,03E-02
60	1	9,00E-04	3,58E-04	1,37E-03	9,27E-02
					1,31E+01
G =	1,39E-02	kg m ⁻¹ s ⁻¹			

Anexo D11.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 9,0 %;

Vazão: 10,0 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,40 m; e

Comprimento médio do sulco: 3,50 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
1	10	5,82E-05	2,77E-06	6,97E-06	5,82E-04
5	10	3,96E-05	1,89E-06	4,74E-06	1,58E-03
10	10	3,56E-05	1,69E-06	4,26E-06	1,78E-03
15	10	2,26E-05	1,08E-06	2,71E-06	1,13E-03
20	10	4,41E-05	2,10E-06	5,27E-06	2,20E-03
25	10	3,18E-05	1,51E-06	3,80E-06	1,59E-03
30	10	4,19E-05	1,99E-06	5,01E-06	2,09E-03
35	10	2,73E-05	1,30E-06	3,27E-06	1,37E-03
40	10	3,63E-05	1,73E-06	4,35E-06	1,82E-03
45	10	2,87E-05	1,36E-06	3,43E-06	1,43E-03
50	10	3,50E-05	1,66E-06	4,18E-06	1,75E-03
55	10	2,81E-05	1,34E-06	3,36E-06	1,41E-03
60	10	3,11E-05	1,48E-06	3,72E-06	1,55E-03
					2,03E-02
G =	1,42E-05	kg m ⁻¹ s ⁻¹			

Anexo D12.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 9,0 %;

Vazão: 18,5 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,60 m; e

Comprimento médio do sulco: 2,83 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
1	3	7,08E-05	7,71E-06	1,29E-05	1,31E-03
5	3	1,59E-05	1,73E-06	2,90E-06	1,18E-03
10	3	8,47E-05	9,23E-06	1,55E-05	7,84E-03
15	3	2,31E-05	2,52E-06	4,21E-06	2,14E-03
20	3	3,53E-05	3,85E-06	6,44E-06	3,27E-03
25	3	3,55E-05	3,86E-06	6,47E-06	3,28E-03
30	3	9,95E-06	1,08E-06	1,82E-06	9,21E-04
35	3	3,06E-05	3,33E-06	5,58E-06	2,83E-03
40	3	1,91E-05	2,08E-06	3,48E-06	1,77E-03
45	3	2,29E-05	2,49E-06	4,18E-06	2,12E-03
50	3	9,48E-06	1,03E-06	1,73E-06	8,77E-04
55	3	2,50E-05	2,72E-06	4,56E-06	2,31E-03
60	3	1,59E-05	1,74E-06	2,91E-06	1,47E-03
					3,13E-02
G =	1,46E-05	kg m ⁻¹ s ⁻¹			

Anexo D13.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 9,0 %;

Vazão: 25,5 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,48 m; e

Comprimento médio do sulco: 2,83 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
1	3	5,03E-04	7,55E-05	1,57E-04	1,28E-02
2	3	3,21E-04	4,82E-05	1,00E-04	8,18E-03
3	3	2,51E-04	3,77E-05	7,84E-05	6,40E-03
4	3	2,91E-04	4,38E-05	9,10E-05	7,43E-03
5	3	3,07E-04	4,61E-05	9,58E-05	7,83E-03
8	3	3,63E-04	5,45E-05	1,13E-04	3,70E-02
10	3	1,88E-04	2,82E-05	5,86E-05	9,58E-03
13	3	6,36E-05	9,55E-06	1,99E-05	4,86E-03
15	3	1,01E-04	1,52E-05	3,17E-05	5,17E-03
18	3	3,95E-05	5,94E-06	1,23E-05	3,02E-03
20	3	4,31E-05	6,47E-06	1,34E-05	2,20E-03
23	3	6,93E-05	1,04E-05	2,16E-05	5,30E-03
25	3	4,39E-05	6,59E-06	1,37E-05	2,24E-03
28	3	3,60E-05	5,41E-06	1,13E-05	2,76E-03
30	3	1,94E-05	2,92E-06	6,07E-06	9,91E-04
35	3	3,10E-05	4,66E-06	9,69E-06	3,96E-03
40	3	4,34E-05	6,52E-06	1,35E-05	5,53E-03
45	3	3,70E-05	5,56E-06	1,16E-05	4,72E-03
50	3	2,32E-05	3,49E-06	7,25E-06	2,96E-03
55	3	2,61E-05	3,92E-06	8,15E-06	3,33E-03
60	3	1,69E-05	2,53E-06	5,27E-06	2,15E-03
					1,38E-01
G =	7,99E-05	kg m ⁻¹ s ⁻¹			

Anexo D14.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Sendo que, os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 9,0 %;

Vazão: 38,5 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,38 m; e

Comprimento médio do sulco: 2,83 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
1	2	1,27E-03	2,88E-04	8,13E-04	4,89E-02
2	2	2,04E-03	4,63E-04	1,31E-03	7,87E-02
3	2	1,17E-03	2,65E-04	7,48E-04	4,50E-02
4	2	1,09E-03	2,48E-04	7,01E-04	4,22E-02
5	2	1,32E-03	3,00E-04	8,47E-04	5,09E-02
6	2	1,58E-03	3,58E-04	1,01E-03	6,08E-02
7	2	7,41E-04	1,68E-04	4,74E-04	2,85E-02
8	2	6,47E-04	1,47E-04	4,14E-04	2,49E-02
9	2	4,63E-04	1,05E-04	2,96E-04	1,78E-02
10	2	2,75E-04	6,24E-05	1,76E-04	1,06E-02
11	2	2,92E-04	6,62E-05	1,87E-04	1,12E-02
12	2	2,63E-04	5,95E-05	1,68E-04	1,01E-02
13	2	2,60E-04	5,89E-05	1,66E-04	1,00E-02
15	2	2,27E-04	5,15E-05	1,45E-04	1,75E-02
18	2	2,20E-04	4,99E-05	1,41E-04	2,54E-02
20	2	2,23E-04	5,05E-05	1,43E-04	1,71E-02
22	2	1,43E-04	3,24E-05	9,16E-05	1,10E-02
25	2	2,78E-04	6,30E-05	1,78E-04	3,21E-02
27	2	2,10E-04	4,76E-05	1,35E-04	1,62E-02
30	2	1,59E-04	3,61E-05	1,02E-04	1,84E-02
35	2	1,14E-04	2,58E-05	7,28E-05	2,19E-02
40	2	1,24E-04	2,81E-05	7,94E-05	2,39E-02
45	2	1,79E-04	4,06E-05	1,15E-04	3,45E-02
50	2	9,15E-05	2,07E-05	5,86E-05	1,76E-02
55	2	9,62E-05	2,18E-05	6,16E-05	1,85E-02
60	2	8,75E-05	1,98E-05	5,60E-05	1,68E-02
G =	5,58E-04	kg m ⁻¹ s ⁻¹			7,10E-01

Anexo D15.- Concentração instantânea de sedimentos (C_{in}), Taxa de erosão em sulcos (Er), Taxa de Desagregação (Dr), Perda de solo (P.S.) e Carga média de sedimentos (G) calculadas para os diferentes intervalos de tempo. Os valores de perímetro molhado e comprimento médio do sulco são referentes aos 15 minutos finais do evento.

Declividade: 9,0 %;

Vazão: 51,0 L.min⁻¹;

Perímetro molhado: 0,29 m; e

Comprimento médio do sulco: 2,83 m.

Tempo	Duração Coleta (s)	C_{in} (kg l ⁻¹)	Er (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Dr (kg m ⁻² s ⁻¹)	P.S (kg)
30 "	1	6,01E-03	1,82E-03	6,35E-03	1,55E-01
1	1	6,83E-03	2,07E-03	7,21E-03	1,76E-01
2	1	5,65E-03	1,72E-03	5,98E-03	2,91E-01
3	1	5,02E-03	1,52E-03	5,30E-03	2,58E-01
4	1	4,63E-03	1,40E-03	4,90E-03	2,39E-01
5	1	5,95E-03	1,80E-03	6,28E-03	3,06E-01
6	1	1,06E-02	3,20E-03	1,12E-02	5,44E-01
7	1	6,05E-03	1,83E-03	6,39E-03	3,11E-01
8	1	9,20E-03	2,79E-03	9,72E-03	4,74E-01
9	1	5,83E-03	1,77E-03	6,16E-03	3,00E-01
10	1	6,97E-03	2,11E-03	7,37E-03	3,59E-01
11	1	7,81E-03	2,37E-03	8,25E-03	4,02E-01
12	1	4,71E-03	1,43E-03	4,98E-03	2,43E-01
13	1	8,63E-03	2,62E-03	9,12E-03	4,44E-01
14	1	5,27E-03	1,60E-03	5,57E-03	2,71E-01
15	1	4,01E-03	1,22E-03	4,24E-03	2,06E-01
16	1	4,53E-03	1,37E-03	4,79E-03	2,33E-01
17	1	4,07E-03	1,24E-03	4,30E-03	2,10E-01
18	1	4,69E-03	1,42E-03	4,95E-03	2,41E-01
19	1	5,03E-03	1,53E-03	5,32E-03	2,59E-01
20	1	1,01E-02	3,07E-03	1,07E-02	5,21E-01
21	1	1,35E-02	4,10E-03	1,43E-02	6,95E-01
22	1	1,05E-02	3,19E-03	1,11E-02	5,41E-01
23	1	1,41E-02	4,27E-03	1,49E-02	7,26E-01
24	1	1,04E-02	3,15E-03	1,10E-02	5,34E-01
25	1	1,98E-02	5,99E-03	2,09E-02	1,02E+00
26	1	2,02E-02	6,12E-03	2,13E-02	1,04E+00
27	1	7,15E-03	2,17E-03	7,55E-03	3,68E-01
28	1	1,60E-03	4,85E-04	1,69E-03	8,23E-02
29	1	1,19E-02	3,60E-03	1,26E-02	6,12E-01
30	1	1,65E-02	5,00E-03	1,74E-02	8,48E-01
31	1	1,00E-02	3,03E-03	1,06E-02	5,15E-01
32	1	1,55E-02	4,69E-03	1,63E-02	7,96E-01
33	1	7,18E-03	2,18E-03	7,58E-03	3,70E-01
34	1	9,40E-03	2,85E-03	9,94E-03	4,84E-01
35	1	4,81E-03	1,46E-03	5,08E-03	2,48E-01
36	1	4,64E-03	1,41E-03	4,91E-03	2,39E-01
37	1	6,57E-03	1,99E-03	6,94E-03	3,38E-01
38	1	6,03E-03	1,83E-03	6,38E-03	3,11E-01
39	1	3,79E-03	1,15E-03	4,01E-03	1,95E-01
40	1	3,33E-03	1,01E-03	3,52E-03	1,71E-01
					1,66E+01
G =	2,41E-02	kg m ⁻¹ s ⁻¹			

Anexo E

**Definição, características e participação dos Latossolos no total dos solos brasileiros,
distribuição geográfica dos Latossolos no Estado do Rio Grande do Sul
e composição da fase sólida mineral do solo**

Anexo E.- Composição da fase sólida mineral do solo

1.- Solo

O solo é uma coleção de corpos naturais, constituído por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos, contendo matéria viva e ocupando a maior porção do manto superficial das extensões continentais do planeta (EMBRAPA, 1999).

O território brasileiro se caracteriza por uma grande diversidade de tipos de solos, correspondendo, diretamente à intensidade de interação das diferentes formas e tipos de relevo, clima, material de origem, vegetação e organismos associados, os quais, por sua vez, condicionam diferentes processos formadores dos solos.

Na região sul, os solos originados de rochas básicas e de sedimentos diversos se encontram distribuídos em uma paisagem com relevo diversificado, onde predomina o clima subtropical, com estações bem definidas e solos predominantemente férteis com elevado potencial agrosilvipastoril. Na região sul, os Latossolos representam em torno de 25,0% dos solos presentes. Os Latossolos são os solos mais representativos do Brasil, ocupando 38,70% da área total do país (3,32 milhões de km²) e distribuem-se em praticamente todo o território nacional (EMBRAPA, 2002).

Os Latossolos são solos resultado de transformações no material de origem ou oriundos de sedimentos pré-intemperizados onde predominam, na fração argila, minerais nos últimos estágios de intemperismo (caulinitas e óxidos de ferro e alumínio), sendo a fração areia dominada por minerais altamente resistentes ao intemperismo. São de textura variável, de média a muito argilosa, geralmente muito profundos, porosos e permeáveis, apresentando pequena diferença no teor de argila em profundidade e, comumente, são de baixa fertilidade natural. Em geral, a macroestrutura é fraca ou moderada, no entanto, o típico horizonte latossólico apresenta forte microestruturação. Existem variados tipos de Latossolos, que se diferenciam, dentre vários outros atributos, pela sua cor, fertilidade natural, teor de óxidos de ferro e textura.

No Rio Grande do Sul, de acordo com Streck *et al.* (2002), os Latossolos foram diferenciados em Latossolos Brunos e Latossolos Vermelhos conforme a cor predominante no horizonte B. Os Latossolos Brunos alumínicos câmbicos (Unidade Vacaria) e típicos (Unidade Erval Grande) ocorrem em áreas da região do Alto Uruguai, bem como na região dos campos de Cima da Serra juntamente com Latossolos Vermelhos distroféricos nitossólicos (Unidade Estação) e típicos (Unidade Santo Ângelo), Latossolos Vermelhos aluminoféricos típicos (Unidade Erechim) e os Latossolos Vermelhos distróficos típicos (Unidade Passo Fundo e Cruz Alta) originados de basalto e arenito, respectivamente.

Latossolos Vermelhos distróficos argissólicos (Unidade Cerrito), originados do arenito, são encontrados em pequena extensão na região de São Sepé.

Os Latossolos possuem boa aptidão agrícola, desde que seja corrigida a sua fertilidade química. Portanto, podem ser utilizados com culturas de inverno e de verão, exigindo práticas conservacionistas adequadas, como por exemplo, plantio direto intercalado com plantas recuperadoras de solo (aveia, ervilhaca e nabo forrageiro), com terraceamento e canais escoadouros protegidos.

1.a.- Constituição do solo

A rocha através do processo de intemperismo físico e químico, irá formar o solo. O solo, na sua fração mineral, terá alguns minerais que permanecem com a sua composição química semelhante àquela existente na rocha (minerais primários), os quais se mantêm, principalmente, nas frações mais grosseiras ($> 50,0\text{mm}$). Os minerais primários comuns em solos são o quartzo e os feldspatos. Os minerais originados a partir da alteração dos minerais primários são chamados de minerais secundários ($< 2,0\mu\text{m}$), sendo os mais comuns em solos os aluminossilicatos, como a caulinita, a vermiculita, as esmectitas; e os óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos.

1.b.- Minerais da fração argila do solo

Apenas parte dos minerais primários constituintes das rochas ocorre nos solos; a sua proporção depende do seu teor no material de origem, da sua estabilidade à alteração, bem como do estado de intemperização do solo. Os minerais mais estáveis são encontrados nas frações areia e silte do solo. A fração argila do solo é constituída principalmente por uma mistura, em proporções variáveis, de novos minerais: os argilominerais e os óxidos.

Os filossilicatos são os minerais que predominam na fração argila dos solos e apresentam estruturas formadas pela sobreposição de lâminas de tetraedros de silício, formando camadas que podem se empilhar sucessivamente, como as folhas de um livro (origem do nome filossilicatos).

A estrutura dos filossilicatos é formada basicamente pela superposição de lâminas de tetraedros de silício (lâminas tetraedrais) e lâminas de octaedros de alumínio (lâminas octaedrais). A lâmina tetraedral é composta pela associação de vários tetraedros formados por um átomo de silício e quatro átomos de oxigênio, formando uma figura com quatro lados (Figura E1). A lâmina octaedral é composta pela associação de vários octaedros constituídos por um átomo de alumínio e seis oxigênios ou hidroxilas, formando uma figura de oito lados (Figura E2).

A seqüência de lâminas, a existência de elementos ou compostos entre a lâminas e as suas substituições isomórficas (substituição do silício ou do alumínio por outro cátion) nas lâminas, determinarão os diferentes argilominerais existentes.

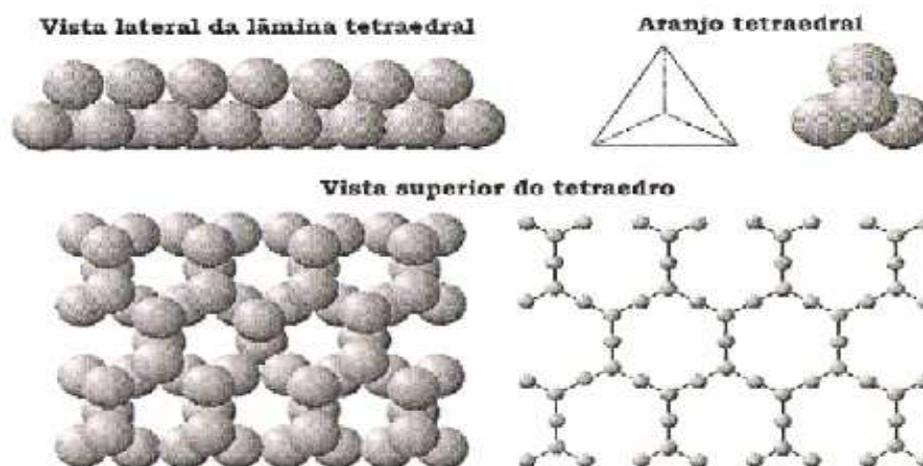


Figura E1.- Lâmina tetraédral vista sob diferentes ângulos e diferentes formas de representação (adaptado de Schulze, 1989) apresentado por Inda Júnior *et al.* (2004).

Os argilominerais podem ser cristalinos ou não cristalinos. Os dois principais tipos de argilominerais cristalinos são os argilominerais 1:1 e os 2:1. Os argilominerais 1:1 são formados pela superposição contínua de uma lâmina tetraédral para cada lâmina octaédral (Figura E3). Os argilominerais 2:1 são formados pela superposição contínua de duas lâminas tetraédrais para cada lâmina octaédral (Figura E3). A caulinita e a haloisita são, argilominerais 1:1 não expansíveis.

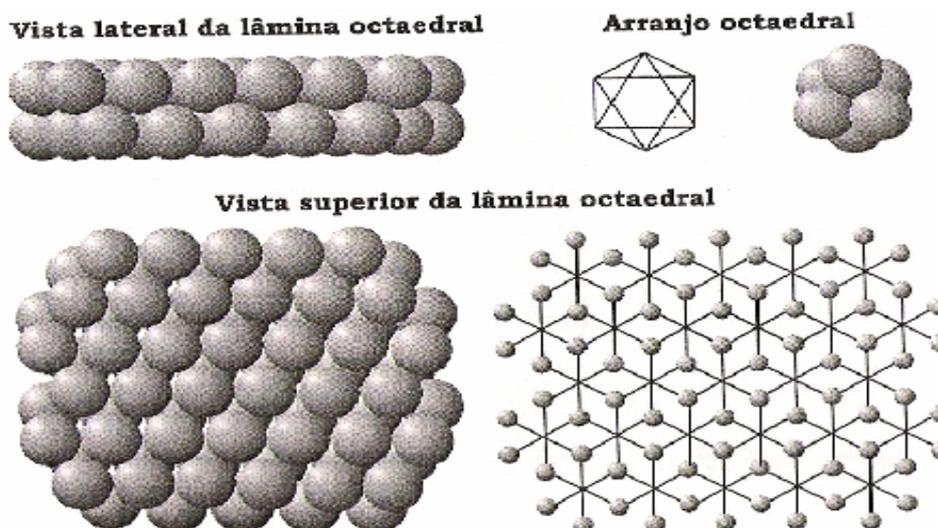


Figura E2.- Lâmina octaédral vista sob diferentes ângulos e diferentes formas de representação (adaptado de Schulze, 1989) apresentado por Inda Júnior *et al.* (2004).

Os argilominerais 2:1 podem ser separados em não expansivos e expansivos (se expandem quando hidratados). As micas, a ilita e a clorita são exemplos de argilominerais 2:1 não expansivos. A vermiculita e as esmectitas são exemplos de argilominerais 2:1 expansivos.

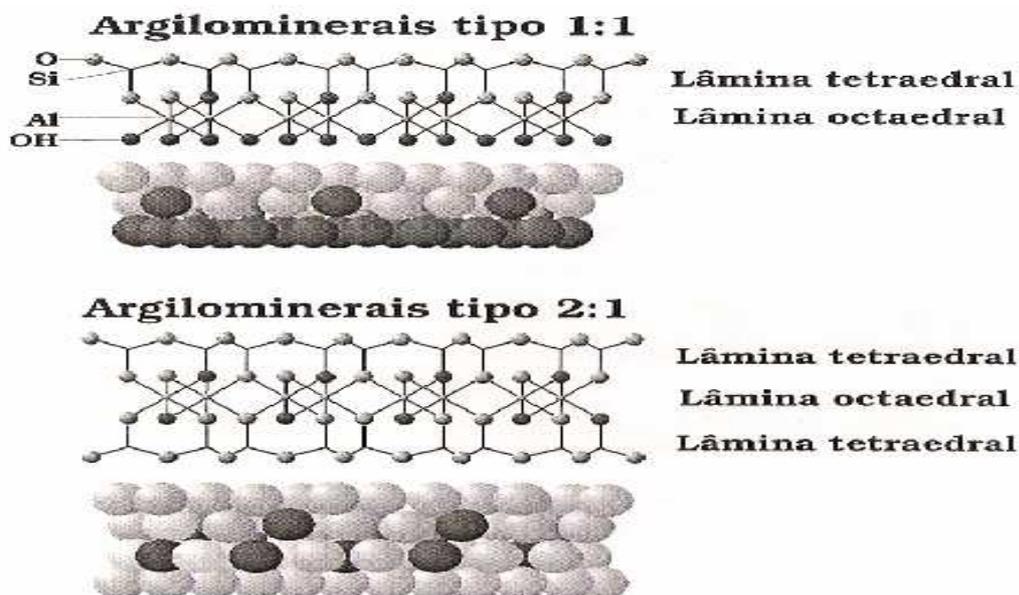


Figura E3.- Lâminas tetraedrais e lâminas octaedrais constituindo as lâminas de argilominerais do tipo 1:1 e 2:1 (adaptado de Schulze, 1989) apresentado por Inda Júnior *et al.* (2004).

a.- **Caulinita:** é um argilomineral 1:1, não expansivo, com distância basal da ordem de 0,72nm e a sua fórmula estrutural é $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Apresenta cargas negativas na superfície externa da lâmina tetraedral e cargas negativas e positivas na superfície lateral das lâminas octaedrais, devido à adsorção ou dissociação de íons hidrogênio, dependendo do pH do meio. A CTC é baixa, variando entre 1,0 e 5,0 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ e a ASE está entre 5,0 e 30,0 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$. É o argilomineral predominante na maioria dos solos de regiões tropicais e subtropicais (Figura E4).

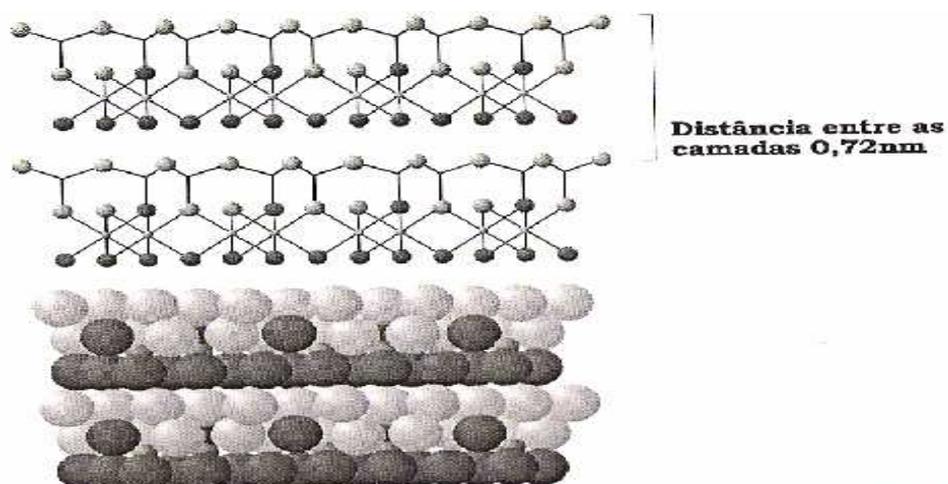


Figura E4.- Estrutura da caulinita e a distância entre camadas de 0,72nm (adaptado de Schulze, 1989) apresentado por Inda Júnior *et al.* (2004).

b.- **Micas**: são argilominerais 2:1, não expansivos com uma distância basal de 1,0nm e com a presença de íons potássio (K^+) entre as camadas tetraedrais (Figura E5). As principais micas existentes são a muscovita cuja composição é $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ e a biotita de composição $K(Mg^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+})_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$. Nos tetraedros há uma substituição parcial de Si^{4+} por Al^{3+} , originando um excesso de cargas negativas na estrutura do mineral, que são compensadas em parte pelos íons potássio entre as camadas. Assim, a capacidade de troca de cátions (CTC) desses minerais varia de 20,0 a 50,0 $cmol_c.kg^{-1}$. A troca dos íons potássio por outros cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e H^+) permite a entrada de moléculas de água nas entrecamadas, aumentando a distância basal. O mineral resultante desta alteração parcial das micas é denominado de illita, parcialmente expansiva, com menor Capacidade de Troca de Cátions (5,0 a 15,0 $cmol_c.kg^{-1}$) e mais pobre em potássio que as micas.

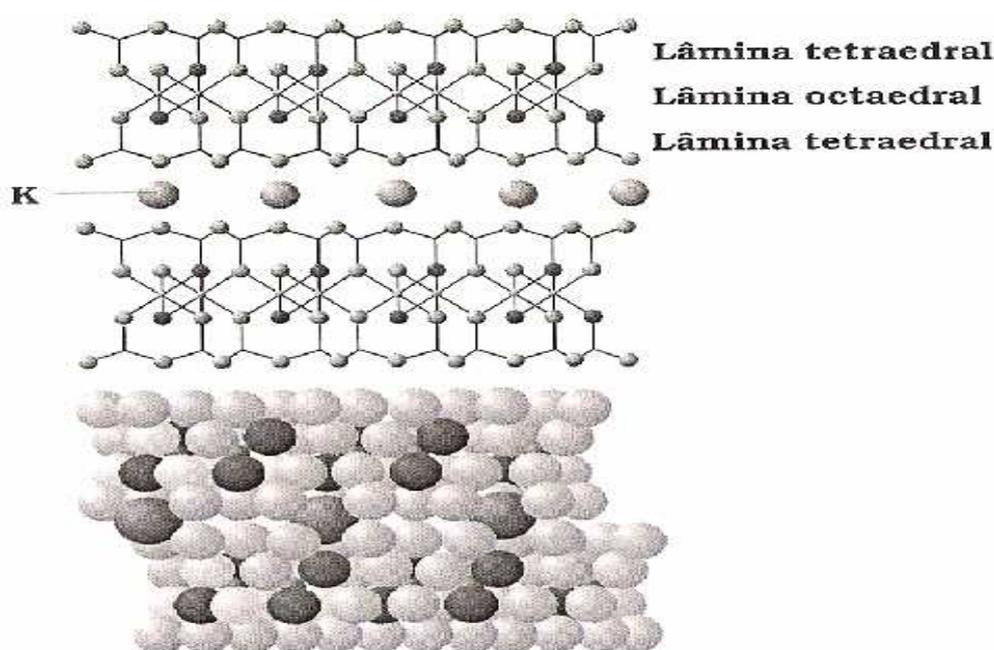


Figura E5.- Estrutura da mica com ligação entre camadas realizada pelo íon K (adaptado de Schulze, 1989) apresentado por Inda Júnior *et al.* (2004).

c.- **Esmectitas**: são argilominerais 2:1 expansivo, cuja distância basal varia de 1,0 a 2,0nm. A esmectita mais comum é a montmorilonita cuja composição é $[M^{+}_{0,5}(Al_{1,5}Mg_{0,5})(Si_4)O_{10}(OH)_2]$. As esmectitas apresentam substituição isomórfica parcial nas lâminas octaédricas, ou seja, em alguns octaedros o alumínio é substituído por outro cátion que apresente raio iônico semelhante. A Capacidade de Troca de Cátions das esmectitas é considerada alta, variando de 80,0 a 120,0 $cmol_c.kg^{-1}$ e a área superficial específica (ASE) é cerca de 800,0 $m^2.g^{-1}$. As esmectitas normalmente ocorrem em solos pouco intemperizados, conferindo-lhes elevada plasticidade, pegajosidade, fendilhamento e dureza.

d.- **Vermiculita:** é um argilomineral 2:1 similar as micas, entretanto, mostra capacidade de expansão, com uma distância basal varia entre 1,0 (quando a vermiculita retém potássio nas entrecamadas) a 1,5nm (quando as entrecamadas são ocupadas por moléculas de água e cátions hidratados: Ca^{2+} , Mg^{2+}). A CTC varia de 100,0 a 200,0 cmolc.kg^{-1} e a ASE é cerca de $750,0\text{m}^2.\text{g}^{-1}$. Ocorrem em solos pouco intemperizados, conferindo-lhes elevada plasticidade e pegajosidade. A vermiculita é capaz de reter o cátion K^+ no solo.

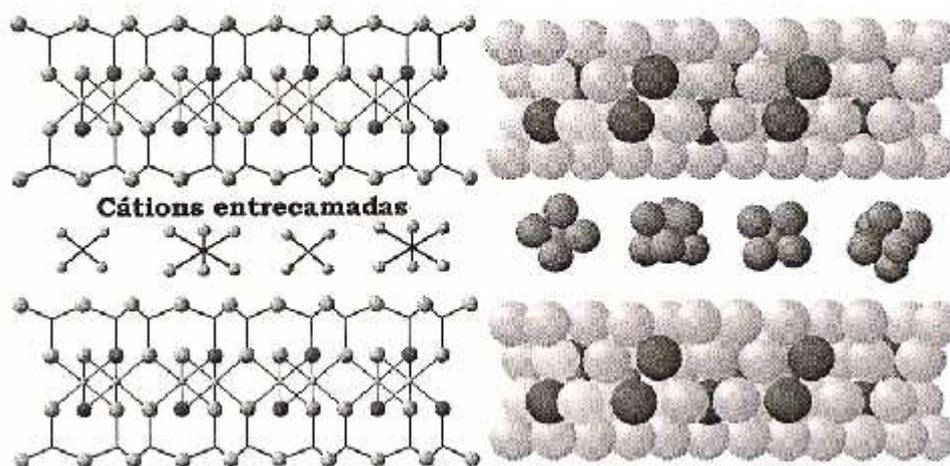


Figura E6.- Estrutura da vermiculita ou da montmorilonita e cátions trocáveis nas entrecamadas (adaptado de Schulze, 1989) apresentado por Inda Júnior *et al.* (2004).

Os oxihidróxidos, genericamente chamados de "óxidos", constituem outro importante grupo de minerais secundários nos solos brasileiros, sendo os mais comuns os óxidos alumínio (gibbsita), ferro (goethita, hematita, lepidocrocita, maghemita e magnetita), manganês (birnessita e litioforita) e titânio (anatásio e rutilo). Os óxidos mais comuns na fração argila são os de ferro e de alumínio, embora estejam normalmente em menor concentração do que os argilominerais. Entretanto, são de grande importância, já que influenciam nas propriedades químicas dos solos.

a.- **Óxidos de ferro:** conferem as cores avermelhadas, amareladas e brunadas utilizadas para distinguir os solos e os seus horizontes. Essas cores indicam as condições do ambiente onde um determinado solo se desenvolveu. Os teores de óxidos de ferro (Fe) nos solos dependem do teor de Fe no material de origem e do grau de alteração dos solos. Os óxidos de Fe apresentam carga variável, positiva ou negativa, variando conforme o pH do solo podendo adsorver ânions ou cátions. Estes óxidos apresentam CTC muito baixa. No entanto, os óxidos de Fe, são agentes de estabilidade estrutural, conferindo uma boa estrutura aos solos. Além disso, eles podem reter fósforo e metais pesados, e de serem fonte de Fe para as plantas.

A goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) é um óxido de ferro que confere cor amarela ao solo, estando presente em condições frias, úmidas, com altos teores de Matéria Orgânica e pH ácido, por exemplo nos Campos de Cima da Serra no RS. A hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) é um óxido de ferro que confere cor vermelha ao solo, predominando em regiões de clima quente, como por exemplo no Planalto Médio e na região das Missões no RS. A lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$) está presente em alguns solos hidromórficos (com excesso de água) na forma de mosqueados alaranjados. A maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) apresenta coloração avermelhada e está presente, predominantemente, em solos tropicais. A magnetita (Fe_3O_4) é um óxido identificado em alguns solos (Latosolo Vermelho) por apresentar atração magnética.

- b.- **Óxidos de alumínio:** a gibbissita ($\gamma\text{-Al(OH)}_3$) é o mais freqüente óxido de alumínio, apresenta baixa CTC e cargas variáveis (positivas ou negativas, dependendo do pH do solo). A gibbissita forma-se em solos muito intemperizados e com baixos teores de silício na solução do solo ($< 0,5\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), ou seja, criando condições difíceis para que ocorra a formação das lâminas tetraedrais dos argilominerais.
- c.- **Óxidos de manganês:** os mais comuns são a birnessita [$(\text{Na}_{0,7}\text{Ca}_{0,3})\text{Mn}_7\text{O}_{14}\cdot 28\text{H}_2\text{O}$] e a litioforita [$(\text{Al},\text{Li})\text{MnO}_2(\text{OH})_2$]. Os óxidos de manganês, embora estejam na maioria das vezes em baixas concentrações no solo, como por exemplo, nos solos da região do Planalto do RS os teores variam de 0,1 a $28,0\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Além disso, os óxidos de manganês podem ser responsáveis pelo suprimento micronutrientes para as plantas como o cobalto, o cobre, o zinco e o molibdênio e são capazes de adsorver fortemente alguns elementos poluentes como o chumbo e o cádmio.