

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ACUMULAÇÃO E BALANÇO DE SEDIMENTOS EM  
SUPERFÍCIES ASFÁLTICAS EM ÁREA URBANA DE  
SANTA MARIA - RS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Cintia Brum Siqueira Dotto**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2006**

# **ACUMULAÇÃO E BALANÇO DE SEDIMENTOS EM SUPERFÍCIES ASFÁLTICAS EM ÁREA URBANA DE SANTA MARIA - RS**

**por**

**Cintia Brum Siqueira Dotto**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil.**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2006**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**ACUMULAÇÃO E BALANÇO DE SEDIMENTOS EM  
SUPERFÍCIES ASFÁLTICAS EM ÁREA URBANA DE SANTA  
MARIA - RS**

elaborada por  
**Cintia Brum Siqueira Dotto**

Como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva, Dr<sup>a</sup>.  
(Presidente/Orientador)**

---

**Nilo de Oliveira Nascimento, Dr.**

---

**Maria do Carmo Cauduro Gastaldini, Dr<sup>a</sup>.**

**Santa Maria, 17 de fevereiro de 2006.**

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família por todo apoio, em especial à minha irmã pela amizade e paciência e ao meu pai pelo suporte às saídas de campo durante os finais de semana e também agradeço o apoio oferecido pela minha mãe e avó.

Ao meu namorado, Mateus, pelo apoio e pela ajuda nas coletas de fim de semana.

À professora Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva, pela oportunidade, orientação, incentivo e dedicação.

Ao professor João Batista Dias de Paiva, pelo incentivo e amizade.

Aos professores do departamento de Hidráulica e Saneamento, em especial ao professor Carlos Ernando pela orientação nos trabalhos de laboratório.

Aos bolsistas de iniciação científica do laboratório e em especial ao Leandro Schneiders Pochmann, Luciano Faustino da Silva e Maikel Bruck Martins.

Aos funcionários Astério do Carmo, Eliomar Pappis e em especial ao Alcides Sartori pela amizade e ajuda nos trabalhos de campo.

À colega Juliana Scapin pela incansável ajuda no processo inicial dos ensaios de laboratório.

Aos colegas, Nádia Bonumá, Francieli Junges, Gilson Piovesan pela amizade e apoio nos trabalhos durante as disciplinas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPQ/CT-Hidro - Brasil pela bolsa de estudo concedida.

Ao Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, FNDCT/CT-HIDRO, através do projeto CTHidro/GURH: FINEP3/2002, pelos recursos financeiros.

## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria

### **ACUMULAÇÃO E BALANÇO DE SEDIMENTOS EM SUPERFÍCIES ASFÁLTICAS EM ÁREA URBANA DE SANTA MARIA - RS**

Autora: Cintia Brum Siqueira Dotto  
Orientadora: Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva  
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 17 de fevereiro de 2006.

Este trabalho apresenta resultados da caracterização dos sedimentos encontrados nas sarjetas de duas ruas asfaltadas em Santa Maria, RS. E também das amostras coletadas na estação hidrossedimentométrica instalada na saída da microdrenagem, que tem como área de contribuição uma das ruas onde ocorreu a coleta dos sedimentos secos. Os trabalhos de campo e de laboratório ocorreram durante o período de abril a dezembro de 2005. As coletas de sedimento na sarjeta foram realizadas durante três períodos distintos de amostragens com duração média de 30 dias. As coletas de amostras líquidas ocorreram durante alguns eventos de precipitação significativos a fim de determinar a concentração de sedimentos em suspensão e a carga proveniente da drenagem. Os resultados das amostras de sedimento seco indicaram que o processo de acumulação dos sedimentos nas superfícies ocorre relativamente rápido após um evento de precipitação. O carreamento das partículas acumuladas nas superfícies depende das características da precipitação e do escoamento, e os dados indicaram que os eventos de precipitação removem apenas uma parte dos sedimentos presentes na superfície. As análises granulométricas das amostras de sedimento seco indicaram um diâmetro médio ( $d_{50}$ ) igual a aproximadamente 0,35 mm em ambas as ruas de amostragem. A concentração de sedimentos proveniente da microdrenagem apresentou valores entre 8,0 a 6.000 mg/L. As análises granulométricas destas amostras constataram que o escoamento transporta partículas, que variam de muito finas a mais grosseiras, com o diâmetro médio variando de 0,01 mm a 12 mm, confirmando o transporte do material presente nas sarjetas e áreas adjacentes pela microdrenagem.

## **ABSTRACT**

M.Sc. Dissertation  
Post Graduation Program in Civil Engineering  
Universidade Federal de Santa Maria

### **SEDIMENT ACUMULATION AND BALANCE ON ASPHALTED SURFACES ON AN URBAN AREA IN SANTA MARIA - RS**

Author: Cintia Brum Siqueira Dotto  
Advisor: Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva  
Date and Local: Santa Maria, February 17<sup>th</sup>, 2006.

This paper presents the results from a street gutter sediment characterization study in two asphalted streets in Santa Maria - RS. It also presents the results from the samples collected at the station installed at the outlet of a drainage system. One of the dry sampled streets is the contribution area of the system. The field and laboratory tests were accomplished from April to December 2005. Dry sediment sampling was done in three different periods, each one of them with about 30 days. The solid-liquid samples were accomplished during some significative storm events in order to determine the suspended sediment concentration and load from the drainage system. The dry sediment samples results indicate that the sediment buildup process on impervious surfaces occurs relatively quickly after a raining event. The accumulated particles washoff depends on the rainfall and runoff characteristics and the data indicate the rainfall events remove only a small portion of the sediments found on the surfaces. The particle size analysis indicate that the two sampled streets present sediments with a measured median diameter of 0,35 mm. The solid-liquid samples concentration values ranged from 8,0 to 6.000 mg/L. These samples particle size analysis presented that the superficial flow carries particles, which range from the finer to coarser, with a median diameter ranging from 0,01 mm to 12 mm, verifying the street sediment washoff through the drainage system.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fontes de sedimento em ambiente urbano. Fonte: Butler & Clark (1995). .....	25
Figura 3.2 - Definição da carga de lavagem segundo Gupta & Saul, 1996. (Adaptado de Bertrand et al.,1998). Fonte: Brites (2005). .....	28
Figura 3.3 - Representação das Curvas M(V) em relação ao bissetor. (Adaptado de Bertrand et al.,1998). Fonte: Brites (2005). .....	29
Figura 3.4 - Distribuição espacial dos sedimentos ao longo da seção de uma rua. Fonte: Butler & Clark (1995). .....	31
Figura 3.5 - Cargas livre e fixa coletadas das três zonas de amostragem ao longo do tempo. Fonte: Vaze e Chiew (2002). .....	35
Figura 3.6 - Distribuição granulométrica da carga livre (a) e fixa (b) encontrada por Vaze e Chiew (2002). Fonte: Vaze e Chiew (2002). .....	36
Figura 3.7 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo de um período seco. Fonte: Vaze e Chiew (2002). .....	37
Figura 3.8 - Distribuição granulométrica dos sedimentos antes e depois do evento de precipitação dos dias 26/08/99 e 27/08/99. Fonte: Vaze e Chiew (2002). .....	37
Figura 3.9 - Representação hipotética do processo de acumulação e carreamento dos sedimentos ao longo do tempo Fonte: Vaze e Chiew (2002). .....	38
Figura 3.10 - Distribuição temporal dos sedimentos ao longo da seção de uma rua. Fonte: Butler & Clark (1995). .....	41
Figura 3.11 - Acumulação de sólidos na superfície. Fonte: Deletic et al. (1997). .....	42
Figura 4.1 - Localização da área de estudo. ....	45
Figura 4.2 - Pluviômetro eletrônico do tipo Pluvio OTT. ....	46
Figura 4.3 - A área de amostragem isolada por uma moldura de madeira e (a) aspirada, (b) levemente escovada e (c) aspirada novamente. ....	47
Figura 4.4 - Desenho esquemático com a disposição das duas zonas de amostragem da rua Marquês do Herval. ....	48

Figura 4.5 - Desenho esquemático com a disposição das quatro quadras de amostragem da rua Rigoberto Duarte. ....	48
Figura 4.6 - (a) Calha implantada na estação fluviossedimentométrica e (b) Planta baixa da calha. ....	50
Figura 4.7 - Valores de $K^*$ , $K_1^*$ , $n_1$ , $n_2$ e grau limite de submergência para a calha medidora funcionando em condições de fluxo livre e submerso. Fonte: Alfaro (1974) <i>apud</i> Martins e Paiva (2001). ....	51
Figura 4.8 - Sensor de velocidades, Nautilus. ....	52
Figura 4.9 - Amostrador ISCO modelo FR7600 instalado na estação hidrossedimentométrica.....	53
Figura 4.10 - Ensaio de sedimentação. ....	55
Figura 4.11 - Ensaio do Tubo de Retirada pelo Fundo. ....	59
Figura 5.1 - Local amostrado na rua Marquês do Herval dia 04/11/05.....	62
Figura 5.2 - Cargas livre e fixa coletadas das duas zonas de amostragem da rua Marquês do Herval durante o primeiro período de amostragem. ....	63
Figura 5.3 - Cargas livre e fixa coletadas das duas zonas de amostragem da rua Marquês do Herval durante o segundo período de amostragem. ....	63
Figura 5.4 - Cargas livre e fixa coletadas das duas zonas de amostragem da rua Marquês do Herval durante o terceiro período de amostragem. ....	64
Figura 5.5 - Valores da precipitação diária na estação pluviográfica Sest Senat no período monitorado. ....	65
Figura 5.6 - Cargas livre e fixa e total da rua Marquês do Herval ao longo do primeiro período de amostragem.....	66
Figura 5.7 - Cargas livre e fixa e total da rua Marquês do Herval ao longo do segundo período de amostragem.....	66
Figura 5.8 - Cargas livre e fixa e total da rua Marquês do Herval ao longo do terceiro período de amostragem.....	67
Figura 5.9 - Cargas totais coletadas das duas ruas durante o primeiro período de amostragem.....	69
Figura 5.10 - Cargas totais coletadas das duas ruas durante o segundo período de amostragem.....	70
Figura 5.11 - Cargas totais coletadas das duas ruas durante o terceiro período de amostragem.....	70



Figura 5.12 - Valores diários da velocidade do vento registrados no período de 31/03/2005 a 05/07/2005.....	71
Figura 5.13 - Valores diários da velocidade do vento registrados no período de 24/10/2005 a 19/12/2005.....	72
Figura 5.14 - Efeito da velocidade do vento e precipitação na carga total de sedimentos na superfície - Primeiro período de amostragem. ....	72
Figura 5.15 - Efeito da velocidade do vento e precipitação na carga total de sedimentos superfície - Segundo período de amostragem. ....	73
Figura 5.16 - Efeito da velocidade do vento e precipitação na carga total de sedimentos superfície - Terceiro período de amostragem.....	73
Figura 5.17 - Distribuição granulométricas da carga livre referente ao primeiro período de amostragem da Rua Marquês do Herval. ....	75
Figura 5.18 - Distribuição granulométricas da carga fixa referente ao primeiro período de amostragem da Rua Marquês do Herval. ....	75
Figura 5.19 - Distribuição granulométricas da carga livre referente ao primeiro período de amostragem da Rua Rigoberto Duarte. ....	76
Figura 5.20 - Distribuição granulométricas da carga fixa referente ao primeiro período de amostragem da Rua Rigoberto Duarte. ....	76
Figura 5.21 - Distribuição granulométricas resultantes do ensaio de peneiramento e sedimentação. ....	77
Figura 5.22 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga livre da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 02/04 a 07/04. ....	80
Figura 5.23 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga fixa da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 02/04 a 07/04. ....	80
Figura 5.24 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga livre da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 25/04 a 05/05. ....	81
Figura 5.25 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga fixa da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 25/04 a 05/05. ....	81
Figura 5.26 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos	

constituintes da carga livre da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 31/05 a 09/06. ....	82
Figura 5.27 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga fixa da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 31/05 a 09/06. ....	82
Figura 5.28 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga livre da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 06/12 a 19/12. ....	83
Figura 5.29 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga fixa da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 06/12 a 19/12. ....	83
Figura 5.30 - Distribuição granulométrica dos sedimentos antes e depois do evento de precipitação do dia 08/08/05 - Rua Marquês do Herval. ....	84
Figura 5.31 - Distribuição granulométrica dos sedimentos antes e depois do evento de precipitação do dia 10/06/05 - Rua Marquês do Herval. ....	84
Figura 5.32 - Distribuição granulométrica dos sedimentos antes e depois do evento de precipitação dos dias 03/07/05 e 04/07/05 - Rua Marquês do Herval. ....	85
Figura 5.33 - Calibração dos parâmetros $M_0$ e $k$ a partir dos dados observados na rua Marquês do Herval. ....	86
Figura 5.34 - Calibração dos parâmetros $M_0$ e $k$ a partir dos dados observados na rua Rigoberto Duarte. ....	87
Figura 5.35 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Marquês do Herval. ....	88
Figura 5.36 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Rigoberto Duarte. ....	88
Figura 5.37 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Marquês do Herval. ....	89
Figura 5.38 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Rigoberto Duarte. ....	89
Figura 5.39 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Marquês do Herval. ....	90
Figura 5.40 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Rigoberto Duarte.	

.....	90
Figura 5.41 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Marquês do Herval. ....	91
Figura 5.42 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Rigoberto Duarte. ....	91
Figura 5.43 - Correlação entre as vazões medidas em campo e as vazões calculadas pela equação da calha calibrada. ....	93
Figura 5.44 - Curva chave obtida através de equação da calha e verificada com os valores medidos em campo. ....	94
Figura 5.45 - Relação entre a concentração de sedimentos e a vazão. ....	96
Figura 5.46 - Gráfico da concentração de sedimentos e vazão no evento do dia 15/06/05. ....	97
Figura 5.47 - Gráfico da concentração de sedimentos e vazão no evento dos dias 03/10/05 e 04/10/05. ....	97
Figura 5.48 - Gráfico da concentração de sedimentos e vazão no evento do dia 23/12/05. ....	98
Figura 5.49 - Relação entre a descarga líquida e a descarga sólida. ....	99
Figura 5.50 - Hidrograma do Evento 15/06/05. ....	100
Figura 5.51 - Hidrograma do Evento 03/10/05 e 04/10/05. ....	100
Figura 5.52 - Hidrograma do Evento 23/12/05. ....	101
Figura 5.53 - Curvas M(V) dos eventos analisados. ....	103
Figura 5.54 - Curvas Máxima Divergência dos eventos analisados. ....	104
Figura 5.55 - Distribuição granulométrica do material coletado as 00:07 do dia 04/10/05. ....	105
Figura 5.56 - Distribuição granulométrica das amostras coletadas nos dia 03/10/05 e 04/10/05. ....	105
Figura 5.57 - Distribuição granulométrica das amostras coletadas nos dia 23/12/05. ....	106
Figura 5.58 - Distribuição granulométrica do material acumulado após o evento do dia 03 e 04/10. ....	107
Figura B1 - Distribuição granulométricas da carga livre referente ao segundo período de amostragem da rua Marquês do Herval. ....	123
Figura B2 - Distribuição granulométricas da carga livre referente ao terceiro	

período de amostragem da rua Marquês do Herval. ....	123
Figura B3 - Distribuição granulométricas da carga fixa referente ao segundo período de amostragem da rua Marquês do Herval. ....	124
Figura B4 - Distribuição granulométricas da carga fixa referente ao terceiro período de amostragem da rua Marquês do Herval. ....	124
Figura B5 - Distribuição granulométricas da carga livre referente ao segundo período de amostragem da rua Rigoberto Duarte. ....	125
Figura B6 - Distribuição granulométricas da carga livre referente ao terceiro período de amostragem da rua Rigoberto Duarte. ....	125
Figura B7 - Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao segundo período de amostragem da rua Rigoberto Duarte. ....	126
Figura B8 - Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao terceiro período de amostragem da rua Rigoberto Duarte. ....	126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Diâmetro médio ( $d_{50}$ ) dos sedimentos secos encontrados na literatura.....	40
Tabela 3.2 - Valores calibrados de $M_0$ e $k$ em locais estudados por Deletic et al. (1997 e 2000).....	42
Tabela 4.1 - Tabela modelo utilizada na análise granulométrica com o método de sedimentação. ....	57
Tabela 4.2 - Tabela modelo utilizada na determinação da concentração e análise granulométrica com o método do tubo de retirada pelo fundo. ....	59
Tabela 5.1 - Distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga livre - Ensaio de peneiramento e sedimentação. ....	78
Tabela 5.2 - Distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga fixa - Ensaio de peneiramento e sedimentação. ....	78
Tabela 5.3 - Diâmetro médio ( $d_{50}$ ) dos sedimentos secos encontrados nesta pesquisa .....	78
Tabela 5.4 - Diâmetro médio ( $d_{50}$ ) dos sedimentos referentes à carga livre e fixa. ....	79
Tabela 5.5 - Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre as cargas observadas e calculadas nos períodos secos mais relevantes no período de monitoramento. ....	92
Tabela 5.6 - Carga sólida dos eventos de cheia medidos. ....	101
Tabela A1 - Precipitação e carga de sedimentos - Primeiro período de amostragem.....	117
Tabela A2 - Precipitação e carga de sedimentos - Segundo período de amostragem.....	119
Tabela A3 - Precipitação e carga de sedimentos - Terceiro período de amostragem.....	121

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a	taxa de acumulação
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
b	constante de remoção
C	coeficiente de fluxo livre
CF	carga fixa
CL	carga livre
cm	centímetro
D	diâmetro equivalente
d <sub>50</sub>	diâmetros médios
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
EUA	Estados Unidos da América
F	adimensional de volume escoado acumulado
g/L	grama por litro
g/m <sup>2</sup>	grama por litro
h	altura de queda
h	hora
ha	profundidade na entrada da calha
k	constante de acumulação
$K^*$	coeficiente em função do comprimento da calha
km	kilômetro
km <sup>2</sup>	kilômetro quadrado
L	leitura no densímetro
L	litro
m	metro
m(t)	massa poluente transportada até o tempo t
M	massa poluente total durante o evento
M	quantidade de sólidos na superfície
M <sub>0</sub>	a máxima quantidade de sólidos esperados na superfície
M <sub>1</sub>	massa resultante do evento
M <sub>2</sub>	massa resultante da acumulação de sedimentos no fundo da calha
M(V)	curva cumulativa da massa poluente vs volume escoado

m <sup>2</sup>	metro quadrado
mg/L	miligrama por litro
MH	Marquês do Herval
MH CF 1P	carga fixa da rua Marquês do Herval no primeiro período de amostragem
MH CF 2P	carga fixa da rua Marquês do Herval no primeiro período de amostragem
MH CL 1P	carga livre da rua Marquês do Herval no primeiro período de amostragem
MH CL 2P	carga livre da rua Marquês do Herval no segundo período de amostragem
mL	mililitro
mm	milímetro
m/s	metro por segundo
m <sup>3</sup> /s	metros cúbico por segundo
M <sub>T</sub>	massa total (M <sub>1</sub> + M <sub>2</sub> )
n°	número
n <sub>1</sub>	expoente de fluxo livre
NBR	Norma Brasileira
P	precipitação
Ps	peso da amostra utilizada no ensaio de sedimentação
Q	vazão
Q <sub>s</sub>	descarga sólida
RD	Rigoberto Duarte
RD CF 1P	carga fixa da rua Rigoberto Duarte no primeiro período de amostragem
RD CF 2P	carga fixa da rua Rigoberto Duarte no segundo período de amostragem
RD CL 1P	carga fixa da rua Rigoberto Duarte no primeiro período de amostragem
RD CL 2P	carga livre da rua Rigoberto Duarte no segundo período de amostragem
S	sul
Sest Senat	estação pluviométrica
t	tempo de sedimentação
T	tempo

T	período decorrente desde o início da primeira chuva da série
t'	período virtual
tdry	duração do período seco antecedente
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
US\$	dólar
v(t)	volume escoado até o tempo t
V	o volume total escoado durante o evento
W	largura do estreitamento
W	oeste
X	carga de sedimentos na superfície
X (T)	carga de sedimentos na superfície ao longo do tempo T
Xu	carga máxima ou de equilíbrio observada
μm	mícrons
γ	peso específico real dos grãos
γw	peso específico do fluido
Δ	diferença máxima entre a curva adimensional de massa poluente acumulada e a curva adimensional de volume escoado acumulado
μ	viscosidade do meio
º	grau
'	minuto
"	segundo
º C	grau Celsius



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>21</b>
2.1. Objetivos específicos:.....	21
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
3.1. Generalidades .....	22
3.2. Movimento do sedimento na bacia hidrográfica .....	24
3.2.1. Carga de lavagem .....	27
3.3. Propagação do sedimento nas ruas .....	30
3.3.1. Acumulação dos sedimentos em superfícies impermeáveis (“buildup”).....	31
3.3.2. Carreamento dos sedimentos em superfícies impermeáveis (“washoff”) .....	32
3.4. Estudos experimentais da propagação de sedimentos na microdrenagem urbana .....	33
3.4.1. Monitoramento da acumulação e propagação do sedimento .....	33
3.4.2. Modelagem da acumulação do sedimento .....	40
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>44</b>
4.1. Localização e descrição da área de estudo.....	44
4.2. Monitoramento hidrológico e sedimentológico.....	45
4.2.1. Dados pluviométricos .....	45
4.2.2. Coleta de sedimento seco .....	46
4.2.3. Monitoramento hidrossedimentométrico.....	49
4.2.3.1. Dados fluviométricos .....	49
4.2.3.2. Coleta de sedimento em suspensão.....	52
4.3. Análises de laboratório .....	53
4.3.1. Análise dos sedimentos secos.....	54
4.3.1.1. Ensaio de peneiramento e sedimentação.....	54
4.3.2. Análise das amostras líquidas .....	57
4.3.2.1. Evaporação.....	58
4.3.2.2. Tubo de retirada pelo fundo.....	58
4.4. Carga de lavagem .....	60

4.5. Aplicação à Modelagem .....	60
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
5.1. Análise das amostras de sedimento seco .....	61
5.1.1. Efeito da Precipitação nas Cargas de Sedimentos .....	64
5.1.2. Efeito da Velocidade do Vento nas Cargas de Sedimentos .....	71
5.1.3. Distribuição Granulométrica dos Sedimentos .....	74
5.1.4. Efeito da precipitação na Distribuição Granulométrica dos Sedimentos .....	84
5.1.5. Aplicação da equação proposta por Sartor and Boyd (1972 e 1974) <i>apud</i> Deletic et al. (1997) .....	85
5.1.5.1. Calibração dos parâmetros .....	85
5.1.5.2. Verificação do modelo .....	87
5.2. Monitoramento fluviográfico .....	93
5.3. Monitoramento sedimentométrico .....	94
5.3.1. Concentração de sedimentos em suspensão .....	95
5.3.2. Descarga sólida em suspensão .....	98
5.3.3. Carga de lavagem .....	103
5.3.4. Análises granulométricas .....	104
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>109</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>116</b>
APÊNDICE A - PLANILHAS DE COLETA DE SEDIMENTO SECO E DADOS PLUVIOMÉTRICOS .....	117
APÊNDICE B - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS DE SEDIMENTO SECO .....	123

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, as alterações provocadas nas características das bacias hidrográficas devido, sobretudo às ações de origem antrópica durante o processo de urbanização têm causado impactos significativos no aproveitamento dos recursos hídricos. Em vista disso, faz-se necessário o desenvolvimento de trabalhos que possibilitem a diminuição do processo de degradação dos recursos hídricos.

A urbanização provoca um aumento na quantidade de poluentes nas bacias hidrográficas, destacando-se os sedimentos, matéria orgânica, bactérias, metais pesados, hidrocarbonetos, pesticidas, etc. O aumento da velocidade e volume da água, transportando tais poluentes, pode causar muitos impactos, que apresentam consequências bastante onerosas, além de prejudicar o corpo d'água receptor e interferir nas condições sanitárias. Conforme Tucci e Collischonn (2000), no Reino Unido, o custo anual relacionado com sedimentos na drenagem era de US\$ 85 a 100 milhões em 1986.

O estudo e a compreensão dos fatores que integram o processo de urbanização e a produção de sedimentos são de grande importância, pois servem de ponto de partida para a elaboração de medidas que visem à maximização do uso dos recursos hídricos disponíveis e à convivência harmônica com a população.

Bannerman et al. (1993) comentam que as ruas representam uma fonte crítica de sedimentos no ambiente urbano. Estes sedimentos são transportados pelo sistema de drenagem até o corpo receptor, causando muitos danos aos constituintes da drenagem e à vida aquática do arroio. A quantificação dos sedimentos em qualquer uma destas fases é de suma importância, uma vez que o conhecimento quali-quantitativo destes sedimentos permite uma avaliação técnica e financeira da manutenção dos sistemas existentes e um planejamento para futuras obras. Butler & Clark (1995) enfatizam a importância do estudo dos problemas, fontes, características e quantidades de sedimento em cada parte do sistema de drenagem. Os autores descrevem que o conhecimento e a quantificação do processo de acumulação dos sedimentos permitem realizar um planejamento de forma que a limpeza das bocas de lobo ocorra antes do sistema encontrar-se obstruído.

Este estudo aborda a avaliação da produção de sedimentos em áreas urbanas, uma vez que há uma grande carência de dados nestes locais não só pela complexidade do fenômeno, mas principalmente devido a sua mutabilidade no tempo e no espaço. Desta forma, é válido salientar que os poucos estudos existentes na área procuram quantificar a produção de sedimentos e não abordam os aspectos relativos à propagação dos sedimentos na bacia. Neste trabalho, busca-se conhecer e analisar o processo de produção e transporte dos sedimentos ao longo das sarjetas até a saída do sistema de microdrenagem, de forma a proporcionar um levantamento de informações e análise de dados que possam subsidiar a modelagem do fenômeno da produção e transporte de sedimentos em bacias urbanas. Além disso, a conscientização sobre os problemas associados aos sedimentos em ambientes urbanos é também uma questão importante nesta pesquisa.

A maior limitação nos estudos existentes é que a maioria deles apenas pressupõe as características dos processos de acumulação e carreamento dos poluentes. Este estudo pretende superar tal limitação através da coleta e análise das cargas de poluentes presentes na superfície.

O trabalho desenvolvido, além da contribuição à pesquisa, colabora com o estudo da produção e propagação de sedimentos em áreas urbanas, uma vez que os resultados fornecem informações importantes ao aprimoramento dos órgãos constitutivos da drenagem urbana e ao posterior tratamento desses efluentes. Os resultados da pesquisa podem servir de orientação ao estudo em outras áreas urbanas com regime de precipitação semelhante e características físicas, de ocupação de solo e declividades.

## **2. OBJETIVOS**

Esta pesquisa tem por objetivo contribuir com o estudo da caracterização e quantificação dos sedimentos provenientes de áreas impermeáveis. Busca-se conhecer e caracterizar o processo de acumulação de sedimentos em superfícies impermeáveis e analisar a carga de sedimentos que chega ao arroio proveniente das águas pluviais.

### **2.1. Objetivos específicos:**

- Quantificação e comparação de sedimento seco de ruas com intensidade de urbanização semelhante, porém com intensidade de tráfego e declividade diferentes;
- Monitoramento hidrossedimentológico na canalização coletora de águas pluviais que drena a área de onde foi avaliado o sedimento seco;
- Avaliação da carga total de sedimento proveniente da microdrenagem;
- Contribuição à modelagem do processo de acumulação dos sedimentos na superfície.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Generalidades**

Com o desenvolvimento das civilizações e o conseqüente crescimento populacional em todo mundo, cresceu também, de forma acelerada, a utilização dos recursos hídricos disponíveis. A construção de obras hidráulicas e a devastação das matas ciliares, entre outras ações antrópicas, alteram as condições naturais das regiões onde ocorrem, trazendo consigo problemas de inundação de áreas e seus efeitos sobre a fauna e a flora (Srinivasan & Siqueira, 2000).

Já há algum tempo, associa-se urbanização à poluição dos corpos d'água, devido aos esgotos domésticos não tratados e aos despejos industriais. Mais recentemente, no entanto, percebeu-se que parte desta poluição gerada em áreas urbanas tem origem no escoamento superficial sobre áreas impermeáveis, áreas em fase de construção, depósitos de lixo ou resíduos industriais e outros. O escoamento superficial da água, nesses locais, carrega o material solto ou solúvel até os corpos d'água, levando, portanto, cargas poluidoras bastante significativas. Além disso, a impermeabilização leva ao aumento do número de vezes em que a bacia produz escoamento superficial e ao aumento das velocidades de escoamento, gerando maior capacidade de arraste e, portanto, maiores cargas poluidoras. As redes de drenagem urbana são responsáveis pela veiculação dessas cargas e sabe-se, hoje, que constituem-se em importantes fontes de degradação de rios, lagos e estuários (Porto, 1995).

O reconhecimento da importância dos sedimentos como um constituinte fundamental na análise da qualidade da água vem crescendo nos últimos anos. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) identificou o sedimento como o poluente mais comum nos rios e arroios americanos (Bent et al., 2001).

De acordo com Deletic et al. (2000), em termos de massa, os sedimentos são os poluentes potenciais mais importantes conduzidos pelo escoamento pluvial. A acumulação de sedimentos acarreta danos pela obstrução das canalizações, prejudicando o desempenho da rede de drenagem projetada. Os sedimentos carregados até o corpo receptor formam depósitos modificando seu leito, originando muitos problemas. Em resumo, as principais conseqüências ambientais da produção

de sedimentos em áreas urbanas são:

- Obstrução das canalizações da rede de drenagem;
- Assoreamento da drenagem, com redução da capacidade de escoamento de condutos, rios e lagos urbanos;
- Transporte de poluentes agregados ao sedimento que contaminam as águas pluviais.

A avaliação da produção de sedimentos em bacias urbanas apresenta grandes dificuldades. Existem muito poucos dados de produção de sedimentos em bacias urbanas, sendo que alguns estudos apontam, conforme Lloret Ramos (1995), para um aumento de 5, 10 e até 50 vezes a produção de sedimentos da bacia hidrográfica original. Tucci e Collischonn (2000) apresentam tabelas da carga sólida para diferentes usos e salientam o caráter transitório da produção de sedimentos durante o processo de urbanização. Segundo Nelson e Booth (2002), em uma localidade situada no oeste da cidade de Washington, as atividades humanas na bacia, principalmente o rápido desenvolvimento urbano, causou um aumento de aproximadamente 50% na produção de sedimento anual.

Matos et al. (1998) descrevem que, de forma geral, em ambientes urbanos, os parâmetros poluentes mais representativos na drenagem parecem ser as partículas (sólidos em suspensão), os metais (sobretudo chumbo, zinco e ferro) e os hidrocarbonetos. Eles apresentam valores médios gerais de concentração de sólidos suspensos em zona rural e urbana de 26 mg/L e 220 mg/L, respectivamente. Os autores salientam que tais valores são bastante variáveis de local para local. Gomes e Chaudhry (1981) estudaram a qualidade das águas pluviais de duas pequenas bacias hidrográficas de São Carlos, SP. Os teores de sólidos apresentaram níveis mais elevados na bacia com maior índice de urbanização com valores de concentrações de sólidos totais variando de 171 mg/L a 3499 mg/L. A concentração de sólidos totais na outra bacia menos urbanizada variou de 165 a 1891 mg/L. Resultados obtidos em bacias hidrográficas rurais em Santa Maria, conforme Branco et al. (1998), mostraram uma variação de 20 a 1200 mg/L para a concentração de sedimentos medida, enquanto Paiva et al. (2001) apresentam valores que chegam a

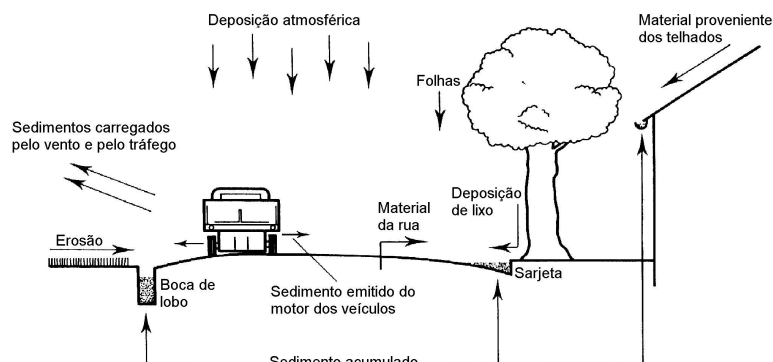
atingir 11000 mg/L, para a mesma região. Posteriormente, Paiva e Costas (2003) apresentam comparação de curvas-chave de sedimentos para pequenas bacias na região de Santa Maria, com diferentes graus de urbanização e características físicas, indicando o aumento da produção de sedimentos com o aumento de urbanização. Scapin (2005) realizou o monitoramento hidrossedimentológico na bacia urbana do arroio Cancela, encontrando valores de concentração de sedimentos variando de 150 a 1600 mg/L. Paz et al. (2004) realizaram pesquisa comparando a carga difusa de uma bacia hidrográfica de características rurais com uma bacia em urbanização próxima, situadas na cidade de Santa Maria, RS. As concentrações médias de sólidos totais, dos eventos analisados, foram de 700 mg/L e 250 mg/L, respectivamente para a bacia em urbanização e a rural.

O conhecimento da quantidade de sedimentos propagada ao longo da bacia até a saída e transportada pelos rios é de fundamental importância para o planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos de uma região, uma vez que os danos causados pelos sedimentos dependem da quantidade e da natureza destes, os quais, por sua vez, dependem dos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos.

### **3.2. Movimento do sedimento na bacia hidrográfica**

Apesar da grande importância da quantificação da produção de sedimentos em bacias hidrográficas, o entendimento dos processos e da interação entre eles passa por um detalhado entendimento de como ocorre a propagação dos sedimentos na bacia até a entrada na rede de macro drenagem. Butler & Clark (1995) comentam sobre a complexidade do movimento do sedimento através da bacia hidrográfica. Apesar de se conhecer as fontes de sedimento (Figura 3.1), não é conhecida a importância relativa de cada fonte. Conforme os referidos autores, as principais fontes são: material decorrente da superfície de estradas e obras nestas, veículos, lavagem de áreas adjacentes (permeáveis e impermeáveis), construção civil, atividades comerciais e industriais, lixo, vegetação, poluição de esgoto, solo junto às estruturas de microdrenagem, telhados e deposição atmosférica.





**Figura 3.1 - Fontes de sedimento em ambiente urbano. Fonte: Butler & Clark (1995).**

O sedimento torna-se um problema quando começa a movimentar-se nas superfícies pavimentadas e tem que ser removido nas etapas seguintes do escoamento na micro e macrodrenagem.

As cargas de poluição associadas às águas pluviais podem ser significativamente maiores do que aquelas encontradas nos esgotos domésticos (Cordery, 1997 *apud* Deletic et al., 1997). Estas cargas podem causar a degradação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, e podem causar sérios problemas nos sistemas de drenagem e dificultar as atividades tradicionais de tratamento.

A geração da poluição nas águas pluviais é um processo complexo que engloba um grande número de fatores relevantes. Segundo Deletic et al. (1997), os fatores principais que influenciam na acumulação dos sedimentos na superfície são: deposição de poeira, tráfego, vento e a erosão de áreas não pavimentadas. O carregamento dos poluentes das superfícies é causado pela precipitação e pelo escoamento, são etapas que ocorrem acima da superfície. Seqüencialmente, as águas poluídas seguem para os sistemas de drenagem, onde os seguintes processos podem ocorrer: deposição dos sedimentos no leito da boca de lobo, suspensão dos sedimentos no fluido ou carreamento dos sedimentos dependendo da taxa de escoamento e do peso da partícula (Deletic et al., 2000). Finalmente, as águas escoam para os arroios, rios ou lagos produzindo efeitos imediatos e cumulativos da poluição.

Segundo Carvalho (2000), os sedimentos não são somente um dos maiores poluentes da água, mas também servem como catalisadores, carreadores e como agentes fixadores para outros agentes poluidores. O sedimento, sozinho, degrada a qualidade da água para consumo humano, para recreação, para o consumo industrial, infra-estruturas hidroelétricas e vida aquática. Adicionalmente, produtos químicos e lixo são assimilados sobre e dentro das partículas de sedimento. Trocas iônicas podem ocorrer entre o soluto e o sedimento. As partículas de sedimento agem como potencializadores dos problemas causados por agentes químicos decorrentes do lixo, resíduos tóxicos, nutrientes, bactérias patogênicas, vírus, etc.

Dessa forma, como reporta a literatura, o uso dos sedimentos como um indicador da poluição para projetos de drenagem urbana é bastante significativo.

Muthukaruppan et al. (2002) comentam que as cargas poluentes podem variar consideravelmente em áreas urbanas, sendo que as duas principais causas de variação são o tipo de uso do solo e as condições sócio-econômicas.

Assim sendo, a minimização dos impactos causados pelos sedimentos na rede de drenagem e nos cursos d'água requer a realização de estudos de caracterização, propagação e quantificação dos sedimentos nas áreas urbanas.

Segundo Vaze e Chiew (2003), uma representação incorreta das fontes de poluição difusa pode levar ao projeto de medidas subestimadas e inadequadas, ou medidas superestimadas com exigência de altos custos de implantação e manutenção.

Conforme Greenway et al. (2002), a quantidade e os tipos de poluentes carreados no escoamento pluvial irá variar de acordo com o uso do solo, a intensidade e a duração dos eventos de precipitação e do período entre esses eventos. O uso do solo pode ser um indicativo dos tipos e concentrações de poluentes. A intensidade e duração dos eventos de precipitação auxiliam no arraste e no transporte de poluentes até os cursos de água. O período entre os eventos de precipitação também afeta a qualidade e a quantidade do escoamento pluvial devido à acumulação de contaminantes nas superfícies impermeáveis entre os eventos. Quando o período entre os eventos aumenta, acumulam-se mais poluentes do que a quantia que pode ser arrastada.

### 3.2.1. Carga de lavagem

Muitas definições foram propostas para descrever a definição e a ocorrência ou não da carga de lavagem durante um evento de precipitação. Segundo Gupta e Saul (1996), as definições geralmente relacionam-se com altas concentrações de sedimentos (e outros poluentes) na primeira parte (não precisamente especificada) do escoamento.

Para avaliar a carga de lavagem, muitos pesquisadores geralmente utilizam curvas da fração acumulada de massa poluente total versus a fração acumulada do volume escoado no evento.

Geiger (1987) apud Deletic (1998) definiu que a carga de lavagem ocorre quando as curvas apresentam uma inclinação inicial maior que 45%, e utilizou o ponto de máxima divergência da inclinação de 45° para quantificar a carga de lavagem.

Saget et al. (1995) apud Gupta e Saul (1996) mencionaram que a carga de lavagem ocorre quando pelo menos 80% da carga é transportada nos primeiros 30% do volume escoado.

O fenômeno da carga de lavagem foi definido por Vorreiter e Hickey (1994) apud Deletic (1998) em termos da carga de poluição nos primeiros 25% do volume escoado no evento.

Gupta e Saul (1996) definiram a carga de lavagem como a parte do evento até a máxima divergência entre a porcentagem acumulada adimensional dos poluentes e a porcentagem acumulada adimensional do volume escoado plotadas em função da porcentagem acumulada do tempo.

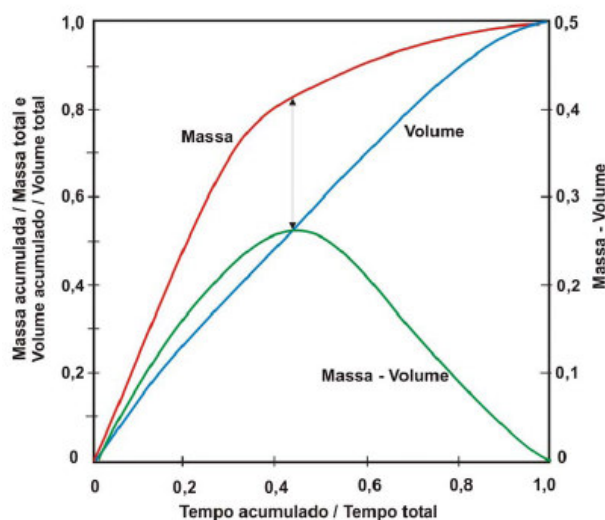
Brites (2005) analisou a ocorrência do fenômeno da carga de lavagem segundo a metodologia descrita por Gupta & Saul (1996) na bacia do arroio Cancela e constatou que 8 eventos, dos 15 analisados, apresentaram carga de lavagem em relação aos sólidos totais.

Brites (2005) descreve que a variabilidade da taxa de massa poluente transportada durante eventos de precipitação na rede de drenagem pode ser descrita por duas curvas: hidrograma  $Q(t)$  e polutograma  $C(t)$  para cada poluente considerado.

Estas curvas, chamadas de curvas  $M(V)$ , possibilitam uma análise adimensional capaz de confrontar eventos de diferentes características e localização.

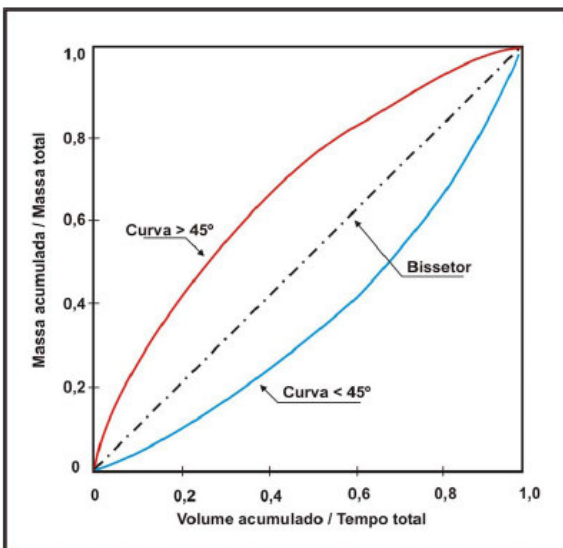
Brites (2005) utilizou a metodologia descrita por Gupta e Saul (1996) e descreve que a diferença dessa representação adimensional do fenômeno com as curvas  $M(V)$  é a inclusão do tempo. Esta variável é explícita nesta representação e implícita para as curvas  $M(V)$ , onde o tempo aumenta juntamente com elas.

A figura 3.2 ilustra a definição do fenômeno conforme Gupta e Saul (1996a).



**Figura 3.2 - Definição da carga de lavagem segundo Gupta & Saul, 1996. (Adaptado de Bertrand et al.,1998). Fonte: Brites (2005).**

Através de análises gráficas das curvas  $M(V)$ , como mostra a figura 3.3, observa-se a posição destas em relação ao bissetor, indicando a distribuição dos poluentes durante todo o evento. Se a curva confunde-se com o bissetor, assume-se que os poluentes são distribuídos uniformemente durante o evento. Quando a curva permanece acima do bissetor, há a ocorrência da carga de lavagem, e quando a curva permanece abaixo do bissetor, não há a ocorrência de carga de lavagem.



**Figura 3.3 - Representação das Curvas M(V) em relação ao bissetor. (Adaptado de Bertrand et al.,1998). Fonte: Brites (2005).**

O traçado da curva  $M(v)$  é realizado a partir da relação entre o volume escoado até o tempo  $t$  e o volume total escoado no eixo das abscissas e da relação entre a massa poluente transportada até o tempo  $t$  e a massa total do evento no eixo das ordenadas conforme as equações 3.1 e 3.2.

$$L = \frac{m(t)}{M} \quad (3.1)$$

$$F = \frac{v(t)}{V} \quad (3.2)$$

onde:

$L$  = adimensional de massa poluente acumulada;

$F$  = o adimensional de volume escoado acumulado

$M$  = massa poluente total durante o evento (g)

$V$  = o volume total escoado durante o evento ( $m^3$ )

$m(t)$  = a massa poluente transportada até o tempo  $t$  (g)

$v(t)$  o volume escoado até o tempo  $t$  ( $m^3$ )

Brites (2005) enfatiza que a definição de máxima divergência considera a ocorrência de carga de lavagem quando a diferença máxima entre a curva adimensional de massa poluente acumulada,  $L$ , e a curva adimensional de volume escoado acumulado,  $F$ , for maior que 0,2. A equação a seguir indica esta diferença.

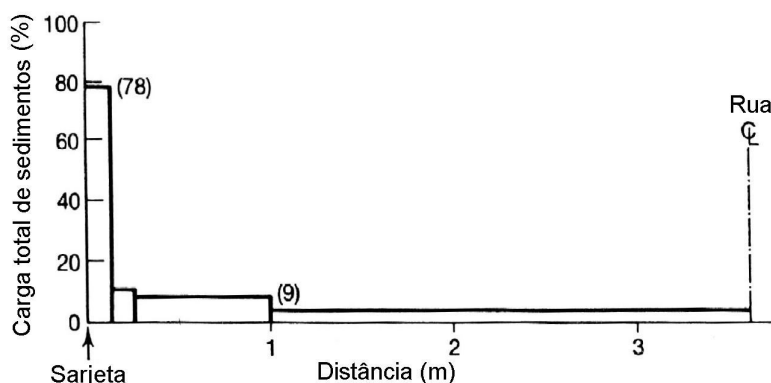
$$\Delta = L - F \quad (3.3)$$

Deletic (1998) conclui que geralmente há poluição o suficiente para ser transportada durante a duração inteira dos eventos típicos, o que significa que a ocorrência da carga de lavagem está mais associada com eventos mais intensos e também com áreas menores.

### **3.3. Propagação do sedimento nas ruas**

Bannerman et al. (1993) concluíram que as ruas são uma fonte crítica de poluentes em qualquer local com diferentes ocupações do solo, uma vez que a maioria das cargas de poluentes pode ser proveniente de ruas em áreas urbanas, residenciais e comerciais, e concluíram também que a seleção de um gerenciamento adequado das áreas impermeáveis é provavelmente a maneira mais efetiva de controlar as cargas de poluentes no escoamento pluvial.

Estudos nos EUA mostraram que a distribuição de sedimentos ao longo de uma rua é muito assimétrica, com mais de 80% dos sedimentos ocupando uma faixa situada a 15 cm do meio fio (sarjeta) conforme ilustrado na figura 3.3 (Butler & Clark, 1995).



**Figura 3.4 - Distribuição espacial dos sedimentos ao longo da seção de uma rua. Fonte: Butler & Clark (1995).**

Deletic et al. (1997, 2000) enfatizam a distribuição não uniforme dos sedimentos e descrevem que 10% deles encontram-se na superfície principal da rua (eixo) e 90% na sarjeta (a sarjeta é definida como uma faixa de 50 cm de largura a partir do meio fio). A massa de sedimentos é distribuída entre a superfície da rua e da calçada, supondo que a calçada tem a taxa de deposição duas vezes maior do que a da superfície da rua.

De acordo com Carvalho (1994), para um bom escoamento das águas pluviais, é necessário que além da construção de um adequado sistema de drenagem urbana, seja realizada a manutenção deste, pois a limpeza das ruas, bocas de lobo, sarjetas e bueiros é fundamental para evitar a obstrução e outros problemas de ineficiência.

O processo de propagação dos sedimentos em superfícies impermeáveis é geralmente descrito utilizando os conceitos de acumulação e carreamento dos sedimentos (Duncan, 2003).

### **3.3.1. Acumulação dos sedimentos em superfícies impermeáveis (“buildup”)**

O processo de acumulação representa toda uma variedade de processos típicos de tempo seco que ocorrem entre os eventos de precipitação, incluindo fenômenos como deposição, erosão devido à ação do vento, processo de limpeza das ruas, etc. Cada um destes processos induz a uma acumulação de sólidos na

superfície e também de outros poluentes que são carreados durante os eventos de precipitação.

O processo de acumulação pode ser quantificado diretamente pela coleta dos sedimentos das superfícies sob as condições de controle previamente definidas. Outra alternativa é a estimativa indireta através da modelagem ou análise estatística das cargas encontradas no escoamento. Não é possível medir diretamente no escoamento, uma vez que as cargas encontradas no escoamento são resultantes do efeito integrado dos processos de acumulação e carreamento.

Porém o processo no qual o sedimento acumula-se na superfície ainda é uma questão de conjectura. Sartor e Boyd (1972) *apud* Butler & Clark (1995) sugeriram a hipótese de uma acumulação não linear ao longo dos períodos secos. Butler & Clark (1995) assumem que a acumulação dos sedimentos na superfície é linear, a menos que sofra interferência da precipitação ou do processo de limpeza urbana.

Duncan (1995) *apud* Duncan (2003) concluiu que a acumulação em superfícies impermeáveis pode ser descrita como um processo de equilíbrio dinâmico agindo entre a deposição e a remoção em um ponto e entre as áreas de contribuição ou não. O processo de acumulação é mediado pelo vento natural e pelo vento induzido através do tráfego de veículos, e é principalmente um processo característico de períodos secos.

### **3.3.2. Carreamento dos sedimentos em superfícies impermeáveis (“washoff”)**

Carreamento é o processo no qual o sedimento seco acumulado é removido da superfície impermeável pela chuva e pelo escoamento e é incorporado no escoamento superficial.

O comportamento do processo de carreamento depende das características da precipitação do escoamento e do local em estudo.

Vaze e Chiew (2003) realizaram na Austrália um estudo de comparação entre o emprego de modelos empíricos considerando as características da precipitação e do escoamento separadamente e a intensidade da chuva e a taxa de escoamento em conjunto para a estimativa das cargas de poluentes nas águas pluviais durante os eventos de precipitação. Em geral, os resultados indicam que a equação empírica



combinando a intensidade da chuva e a taxa de escoamento foi a que apresentou o melhor desempenho e que, uma vez calibrada, a equação pode estimar as cargas de poluentes satisfatoriamente. As equações 3.4 a 3.8 foram utilizadas pelos autores, onde  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , e  $d$  são os parâmetros do modelo.

$$carga = a(precipitação\ total)^b \quad (3.4)$$

$$carga = a(descarga\ líquida)^b \quad (3.5)$$

$$carga = a \sum_{i=1}^n (precipitação\ discretizada\ em\ 1\ min)^b \quad (3.6)$$

$$carga = a \sum_{i=1}^n (taxa\ de\ escoamento\ em\ 1\ min)^b \quad (3.7)$$

$$carga = a \sum_{i=1}^n (precipitação\ discretizada\ em\ 1\ min)^b + c \sum_{i=1}^n (taxa\ de\ escoamento\ em\ 1\ min)^d \quad (3.8)$$

No mesmo estudo, os autores verificaram que as cargas estimadas considerando apenas os pequenos eventos foram melhores do que aquelas onde todos os eventos foram considerados. Tal resultado é devido à pequena variação nos conjuntos de dados dos pequenos eventos, onde a lavagem ocorre principalmente das áreas impermeáveis, enquanto nos eventos maiores, há muitas contribuições da lavagem de áreas permeáveis.

### **3.4. Estudos experimentais da propagação de sedimentos na microdrenagem urbana**

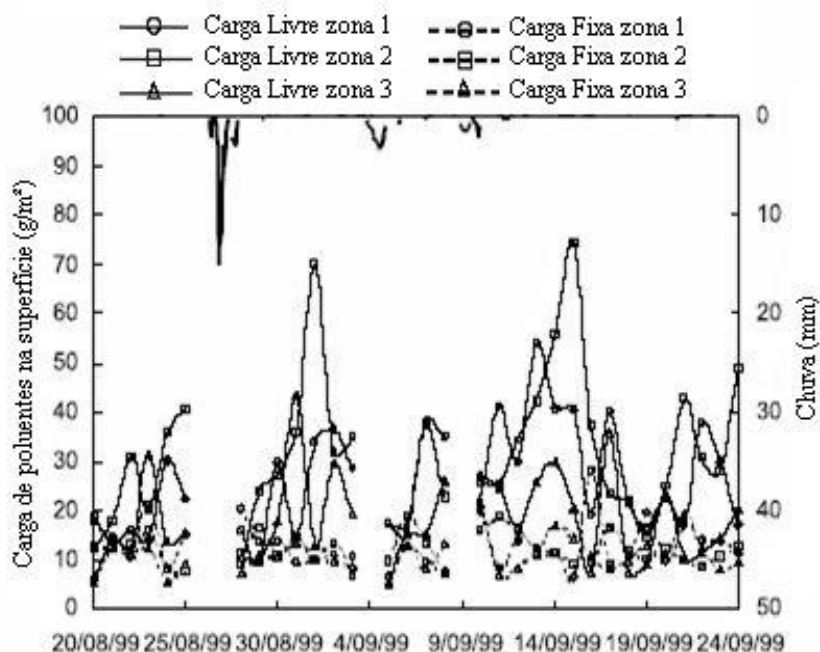
#### **3.4.1. Monitoramento da acumulação e propagação do sedimento**

Vaze & Chiew (2002) desenvolveram um estudo apresentando resultados de uma pesquisa de campo realizada para avaliar a acumulação de poluentes em uma rodovia urbana, em Melbourne, na Austrália. A pesquisa investigou a suscetibilidade

e a variabilidade da carga de poluentes em uma rodovia urbana, a partir de amostras coletadas durante um período de 36 dias.

As amostras de sedimento seco foram coletadas ao longo de 300 m da superfície de uma rua asfaltada com um tráfego médio de 3.000 veículos por dia. A fim de se obter uma amostra representativa, a área foi dividida em três zonas, e aproximadamente no mesmo horário, uma área de 0,5 m<sup>2</sup> era escolhida em cada uma delas, para a coleta dos sedimentos através de um aspirador de pó modificado. Dois tipos de cargas de poluentes foram coletadas. Primeiro, a superfície da rodovia foi aspirada sem nenhum processo de escovação e a carga coletada foi definida como carga livre. Em seguida, a mesma superfície foi levemente escovada utilizando-se uma escova de fibra para que os poluentes finos agregados à superfície fossem soltos. Esse material foi coletado e definido como carga fixa.

As amostras foram secas em estufa a 100° C por 24 horas para remover toda a umidade. Cada amostra foi pesada imediatamente após a saída da estufa. Depois de todas as amostras diárias serem pesadas, as amostras de carga livre foram misturadas a fim de se obter uma amostra representativa do local. O mesmo processo foi realizado com as cargas fixas. As correlações entre as cargas coletadas das superfícies mostraram-se relativamente baixas indicando uma grande variação espacial da carga de superfície. A figura 3.5 a seguir apresenta as cargas encontradas por Vaze e Chiew (2002) nas zonas de amostragem.



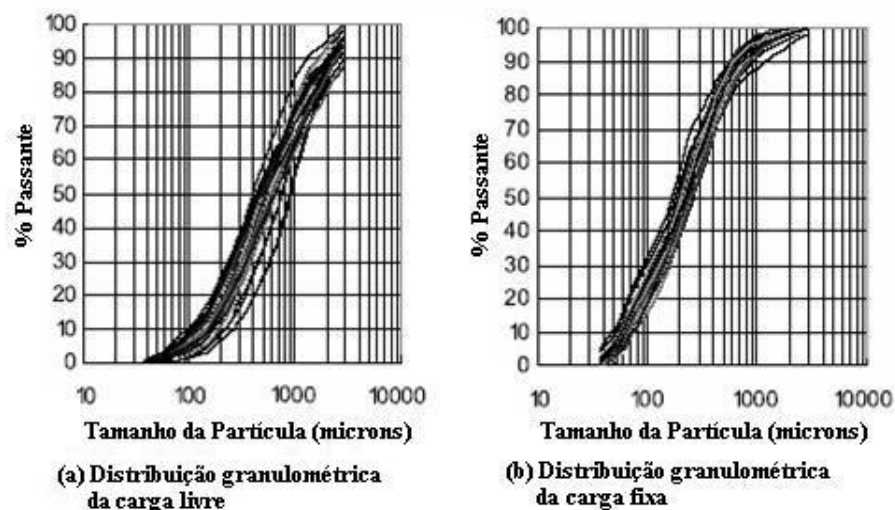
**Figura 3.5 - Cargas livre e fixa coletadas das três zonas de amostragem ao longo do tempo. Fonte: Vaze e Chiew (2002).**

Os efeitos da chuva e do processo de limpeza da rua nas cargas de poluentes foram analisados, mostrando que a carga total de poluentes na superfície geralmente aumenta ao longo dos dias secos. Parte desta carga acumulada é carregada durante os eventos chuvosos.

Os resultados sugeriram que eventos típicos não removeram toda a carga de poluentes. Segundo Chiew et al. (1997) *apud* Vaze & Chiew (2002), um estudo mostrou que os eventos típicos de precipitação removem apenas uma pequena porção do total de poluentes sobre as superfícies e que a carga de poluentes presente na superfície é sempre maior do que aquela que poderia ser carregada por um evento de precipitação. Desta forma, o carregamento dos poluentes depende principalmente das características da precipitação e do escoamento.

Os autores apresentaram também o efeito dos períodos secos e da chuva na distribuição granulométrica dos poluentes. As análises indicaram que quase toda carga livre é mais fina que 3.000  $\mu\text{m}$  e que a carga fixa é mais fina que a carga livre. Quase toda a carga fixa é mais fina que 1.000  $\mu\text{m}$ . Os eventos típicos de

precipitação reduzem a carga livre e aumentam sua granulometria. As precipitações também aumentam a quantidade e a proporção de material fino na carga fixa devido ao fato de que a chuva dissolve as partículas mais finas da carga livre, algumas delas são carregadas pelo escoamento e as remanescentes são agregadas à superfície em forma de carga fixa. Além disso, os nutrientes são agregados aos sedimentos mais finos, portanto para reduzir efetivamente as cargas de nutrientes nas partículas, os tratamentos devem ser capazes de remover as partículas mais finas e não somente o sedimento total ou a carga de sólidos suspensos. As figuras 3.6 e 3.7 apresentam as curvas granulométricas e a mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo de um período seco, respectivamente.



**Figura 3.6 - Distribuição granulométrica da carga livre (a) e fixa (b) encontrada por Vaze e Chiew (2002). Fonte: Vaze e Chiew (2002).**

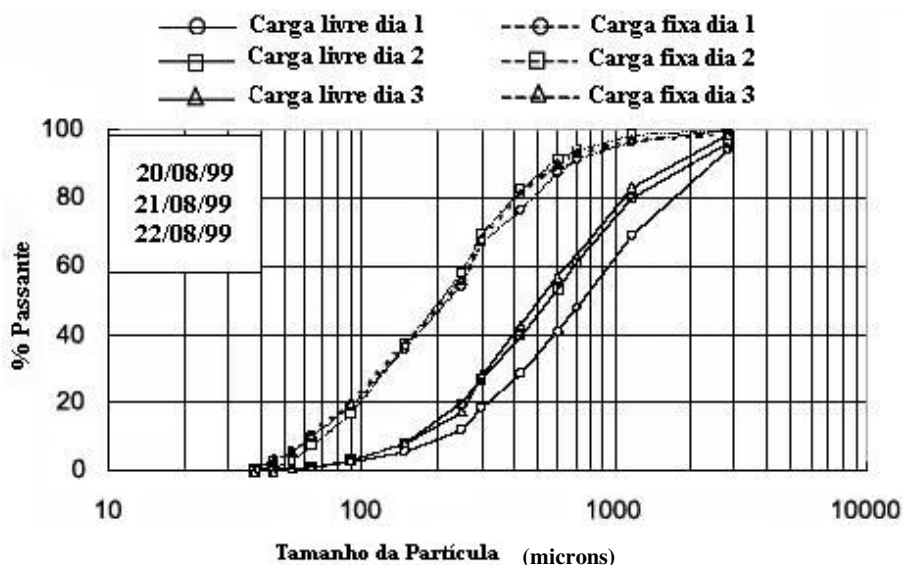


Figura 3.7 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo de um período seco. Fonte: Vaze e Chiew (2002).

A figura 3.8 apresenta o efeito de um evento de precipitação na granulometria dos sedimentos conforme discutido acima.

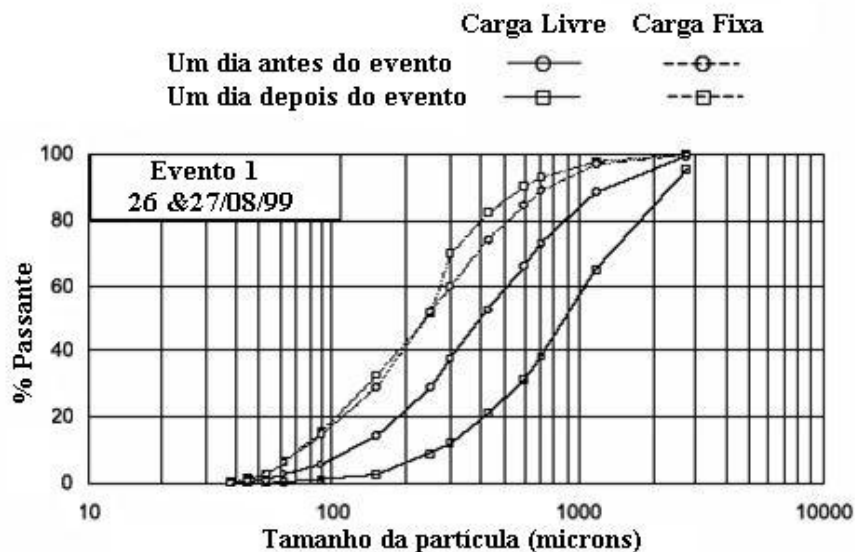
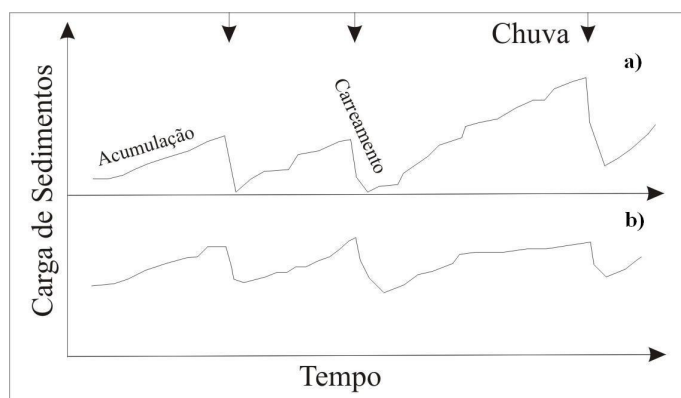


Figura 3.8 - Distribuição granulométrica dos sedimentos antes e depois do evento de precipitação dos dias 26/08/99 e 27/08/99. Fonte: Vaze e Chiew (2002).

No mesmo trabalho Vaze e Chiew (2002) apresentaram duas hipóteses quanto ao processo de acumulação de sedimentos. A primeira, mais aceita nos modelos de qualidade da água, assume que a carga de poluentes acumula-se a partir do zero ao longo de um período de dias secos. Neste caso praticamente toda a carga de poluentes é carregada durante os eventos de precipitação (Figura 3.9 a). A segunda concepção é de que os eventos de precipitação removem apenas uma pequena quantidade dos sedimentos presentes na superfície e que a acumulação destes ocorre relativamente rápida após um evento, e também que ao longo dos dias secos a quantidade de sedimentos tende a retornar ao nível existente antes do evento (Figura 3.9 b). Esta abordagem e a relevância da redistribuição dos sedimentos ao longo dos dias secos resultariam em uma quantidade praticamente uniforme de sedimentos ao longo da superfície durante diferentes períodos.



**Figura 3.9 - Representação hipotética do processo de acumulação e carregamento dos sedimentos ao longo do tempo Fonte: Vaze e Chiew (2002).**

Os autores constataram também que a acumulação de poluentes ao longo de dias secos ocorre relativamente rápido após um evento de precipitação, mas torna-se lento depois de alguns dias.

Muthukaruppan et al. (2002) realizaram um estudo englobando a caracterização do sedimento seco em sarjetas e ruas de algumas regiões de Melbourne, Austrália. Os sedimentos secos foram coletados de quatro áreas residenciais de semelhante nível sócio-econômico através de um aspirador de pó modificado. As coletas foram realizadas nas superfícies das ruas, e ao longo das sarjetas. Com a intenção de considerar e analisar algumas variabilidades, as

amostras foram coletadas de três superfícies diferentes e de três locais de sarjeta em cada região. Cada uma das três amostras foi então misturada a fim de se obter uma amostra representativa dos sedimentos da superfície da rua e da sarjeta. As amostras foram peneiradas através de uma peneira de 1 mm e só foram utilizadas para as análises posteriores os sedimentos passantes nessa peneira.

Os resultados das análises da distribuição granulométrica através do peneiramento seco, para as quatro regiões foram semelhantes, com 5% das partículas menores que 0,45 mm e diâmetro médio ( $d_{50}$ ) de 0,25 mm.

A definição da distribuição granulométrica dos sedimentos propagados no sistema de drenagem até o corpo receptor é considerada um elemento importante no entendimento do processo e desenvolvimento de projetos adequados dos componentes do sistema de drenagem, uma vez que se pode definir as granulometrias propagadas até o corpo receptor e as partículas que ficam retidas nas bocas de lobo.

A distribuição granulométrica torna-se fundamental também no melhor entendimento da distribuição de contaminantes associados às diferentes granulometrias, o que torna possível a seleção e o projeto de medidas de tratamento apropriadas para os poluentes definidos.

Com o objetivo de quantificar as características dos sedimentos e para determinar as cargas e as taxas de acumulação, Butler & Clark (1995) realizaram um programa de coleta dos sedimentos presentes nas superfícies das ruas. As coletas foram realizadas em 6 ruas distintas na Inglaterra.

As análises indicaram que o diâmetro médio das amostras foi de 0,4mm e que 10% do material é menor que 0,063 mm e que 90% é menor que 16 mm.

A tabela 3.1 apresenta os valores dos diâmetros médios ( $d_{50}$ ) encontrados nos estudos descritos.

Tabela 3.1 - Diâmetro médio ( $d_{50}$ ) dos sedimentos secos encontrados na literatura.

Local de Amostragem	Fonte	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )
London Borough of Lambeth, Londres, Inglaterra	Butler e Clark, 1995	$\approx 400$
Beechwood, Dundee, Escócia	Deletic <i>et al.</i> , 2000	$\approx 8000^*$
Commercial Street, Dundee, Escócia	Deletic <i>et al.</i> , 2000	$\approx 1600^*$
Melbourne, Austrália	Muthukaruppan <i>et al.</i> , 2002	$\approx 250^{**}$
Bouverie Street, Melbourne, Austrália	Vaze e Chiew, 2002	$\approx 500$

\* Partículas menores que  $63 \mu\text{m}$  não foram fracionadas.

\*\* Foram fracionados apenas os sedimentos menores que  $1000 \mu\text{m}$ .

### 3.4.2. Modelagem da acumulação do sedimento

Butler & Clark (1995) sugeriram um modelo de acumulação dos sedimentos na superfície assumindo que o processo de acumulação é linear, a menos que sofra interferência da precipitação e do sistema de limpeza. O modelo foi verificado através da utilização de dados coletados em 6 locais diferentes e sugeriu que a acumulação de sedimentos na superfície entra em equilíbrio ao longo do tempo devido ao efeito de dois processos contrários: a acumulação e a remoção dos sedimentos ao longo do tempo.

Assumindo que a deposição de sedimentos é constante e que a remoção pela chuva e pela limpeza da rua é proporcional a quantidade de sedimento presente na superfície, tem-se:

$$\frac{dM}{dt} = a - bM \quad (3.9)$$

Onde:

$M$  = carga de sedimentos na superfície ( $\text{g}/\text{m}^2$ )

$t$  = tempo (em semanas)

$a$  = taxa de acumulação ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{semana}$ )

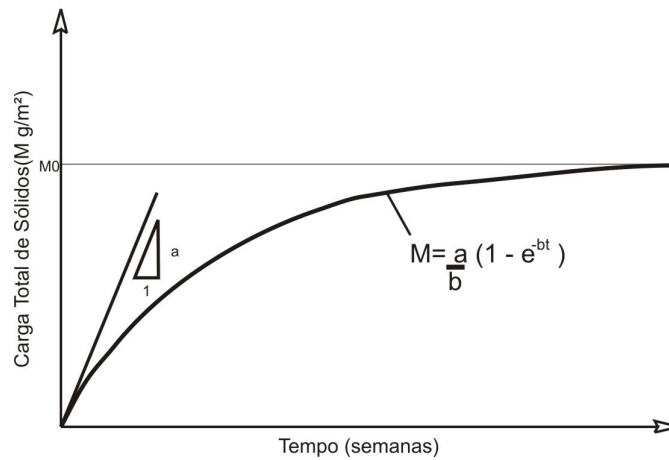
$b$  = constante de remoção ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{semana}$ )

Integrando, a seguinte expressão é obtida para  $M$ :



$$M = M_0 (1 - e^{-bt}) \quad (3.10)$$

A equação produz uma curva exponencial de acumulação, que é assintótica a carga máxima ou de equilíbrio,  $M_0 = a/b$ . Assim, a quantidade de sedimento na superfície está diretamente relacionada à taxa de acumulação e é inversamente à constante de remoção.



**Figura 3.10 - Distribuição temporal dos sedimentos ao longo da seção de uma rua.**

**Fonte: Butler & Clark (1995).**

A taxa de acumulação de sedimentos nos locais estudados variou de 7 a 20 g/m<sup>2</sup>/semana e apresentou uma média de 14 g/m<sup>2</sup>/semana. A constante de remoção nestes locais foi em média 0,12 g/m<sup>2</sup>/semana representando o efeito da precipitação e da limpeza das ruas no processo de remoção dos sedimentos da superfície.

Sartor and Boyd (1972 e 1974) *apud* Deletic et al. (1997) sugeriram uma relação exponencial entre a quantidade de sólidos disponíveis na superfície,  $M$ , e a duração do tempo seco antecedente,  $t_{dry}$ . Esta aproximação, que foi escrita para uma série de eventos de precipitação, tem sido aceita por outros autores e é utilizada na prática em alguns modelos.

$$M(T) = M_0 (1 - e^{-k(t_{dry} + t)}) \quad (3.11)$$

Onde:

$M$  = quantidade de sólidos na superfície ( $\text{g/m}^2$ )

$T$  = período decorrente desde o início da primeira chuva da série (dia)

$t_{\text{dry}}$  = duração do período seco antecedente e

$t'$  = período virtual (dia)

$M_0$  = a máxima quantidade de sólidos esperados na superfície ( $\text{g/m}^2$ )

$k$  = constante de acumulação ( $\text{dia}^{-1}$ )

Há dois parâmetros de calibração na equação (3.11),  $M_0$  e  $k$  que devem ser determinados para cada local:

O período virtual,  $t'$  é utilizado para auxiliar na aplicação da relação exponencial para uma série de precipitações e é calculado assumindo que a deposição é zero em  $t'$  dias antes do começo da chuva antecedente.

A figura 3.11 apresenta a acumulação dos sólidos na superfície de acordo com a equação 3.11.

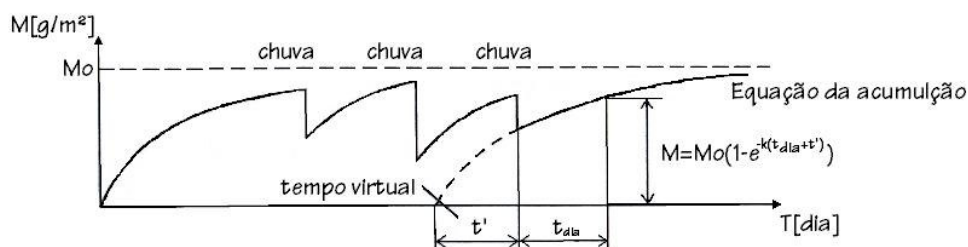


Figura 3.11 - Acumulação de sólidos na superfície. Fonte: Deletic et al. (1997).

Deletic et al. (1997 e 2000) discutem os valores encontrados para  $M_0$  e  $k$  para locais de superfícies asfálticas com diferentes usos do solo. A tabela 3.2 apresenta os valores calibrados.

Tabela 3.2 - Valores calibrados de  $M_0$  e  $k$  em locais estudados por Deletic et al. (1997 e 2000).

Local	Fonte	Uso do solo	$M_0$ ( $\text{g/m}^2$ )	$K$ ( $\text{dia}^{-1}$ )
Beechwood, Dundee, Escócia	Deletic <i>et al.</i> , 2000	Residencial, estacionamento	27	0,015
Commercial Street, Dundee, Escócia	Deletic <i>et al.</i> , 2000	Rua com tráfego intenso	100	0,100
Miljakovac-Belgrade, Suécia	Deletic <i>et al.</i> , 1997	Rua com tráfego médio	10	0,045
Lund, Suécia	Deletic <i>et al.</i> , 1997	Estacionamento	18	0,015

Deletic et al. (1997) comentam que o coeficiente de acumulação  $k$  varia principalmente com o uso do solo. O local de maior tráfego apresentou o maior valor de  $k$  e de  $M_0$ , uma vez que os autores sugerem que  $M_0$  é função do uso do solo e da rugosidade da superfície. Porém, a remoção dos sólidos pelo tráfego dos automóveis em Miljakovac-Belgarde não permitiu que os sedimentos se fixassem na superfície a partir de certo nível. Este pode ser o motivo pelo qual o máximo de sólidos acumulado na superfície,  $M_0$ , é maior em Lund do que em Miljakovac.

Os autores sugerem que maiores investigações do processo de acumulação devem ser realizadas a fim revelar a relação entre os parâmetros de calibração  $M_0$  e  $k$  e os fatores que envolvem o processo.

Sartor e Boyd (1972) *apud* Deletic et al. (1997) apresentam estudos que indicam que o diâmetro médio das partículas encontradas em superfícies impermeáveis varia de 200 a 500  $\mu\text{m}$  e que a precipitação e o escoamento são capazes de trazer em suspensão apenas as partículas mais finas com  $d_{50}$  entre 80 e 100  $\mu\text{m}$ .

Os estudos descritos apresentam informações de grande interesse, relativos à quantificação, propagação e modelagem dos sedimentos na micro-drenagem urbana. Tais trabalhos serviram de base para a instalação de estudo experimental de caracterização dos sedimentos encontrados nas sarjetas de superfícies asfálticas e o seu comportamento em relação à saída do sistema de drenagem. Constatou-se, porém, a carência de estudos que caracterizem todo o processo de acumulação e carreamento dos sedimentos desde a sarjeta até a saída da microdrenagem. Os resultados obtidos podem ser comparados com os valores e comportamentos observados por outros autores em diferentes locais do mundo.

## **4. METODOLOGIA**

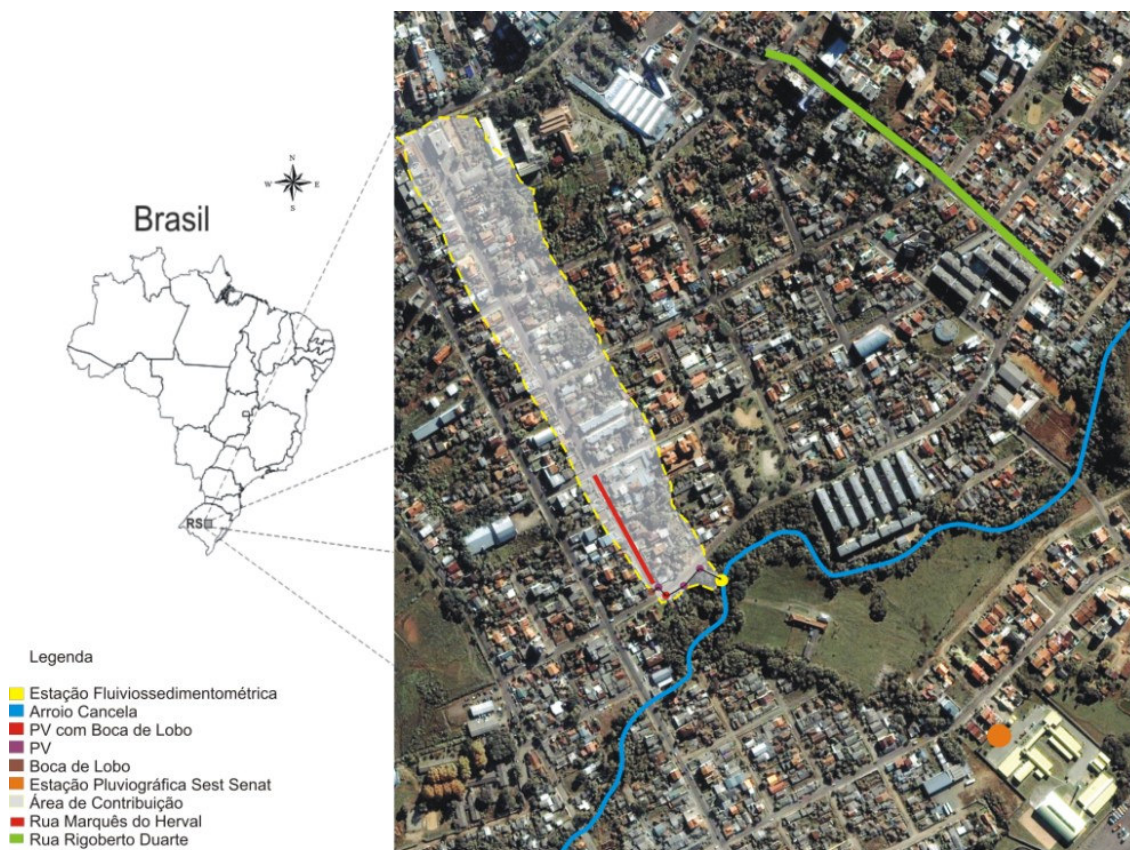
### **4.1. Localização e descrição da área de estudo**

A pesquisa foi desenvolvida na cidade de Santa Maria. A região de estudo encontra-se inserida na bacia do arroio Cancela. O Arroio Cancela drena uma área de 5,01 km<sup>2</sup> e perímetro de 9,52 km. O rio principal possui 3,44 km de extensão e declividade média de 0,020 m/m. A bacia, que é predominantemente urbana, apresenta monitoramento hidrossedimentológico, de qualidade da água e resíduos sólidos no seu exutório, além de completa caracterização do uso do solo atual através de imagem de satélite Ikonos.

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram selecionadas duas ruas localizadas na porção sudoeste da bacia do arroio Cancela, a rua Marquês do Herval e a rua Rigoberto Duarte, que foram monitoradas através da coleta de sedimentos secos ao longo das sarjetas. Em ambas as ruas não ocorre nenhum tipo de limpeza urbana. Dessa forma, os poluentes que nelas se depositam são carregados pela chuva diretamente para as bocas de lobo seguindo para o arroio Cancela, onde são lançados sem nenhum tratamento prévio.

A região em torno das ruas é predominantemente residencial com a presença de alguns estabelecimentos comerciais.

Foi instalada uma estação hidrossedimentométrica na saída do sistema de drenagem de uma das ruas onde ocorre o monitoramento dos sedimentos secos. A área de contribuição é de aproximadamente 0,06 km<sup>2</sup>.



**Figura 4.1 - Localização da área de estudo.**

Foram realizadas coletas de sedimento seco na rua Marquês do Herval e monitoramento hidrossedimentológico na saída da canalização coletora das águas pluviais provenientes desta rua. Foram realizadas coletas de sedimento seco na rua Rigoberto Duarte a fim de obter dados comparativos em relação à acumulação dos sedimentos em superfícies impermeáveis.

## **4.2. Monitoramento hidrológico e sedimentológico**

### **4.2.1. Dados pluviométricos**

Os dados de precipitação foram obtidos da estação pluviométrica Sest-Senat localizada próxima às ruas de estudo conforme a Figura 4.1.

A estação pluviográfica Sest Senat, localiza-se dentro da propriedade da empresa Sest Senat, nas coordenadas "29°42'13,93" S e "53°48'02,58" W, tendo início de operação em dezembro de 2003.

A estação é composta por um pluviômetro eletrônico do tipo Pluvio-OTT, com tempo de um minuto entre cada leitura a partir do início da precipitação, ilustrado na figura 4.2.



**Figura 4.2 - Pluviômetro eletrônico do tipo Pluvio OTT.**

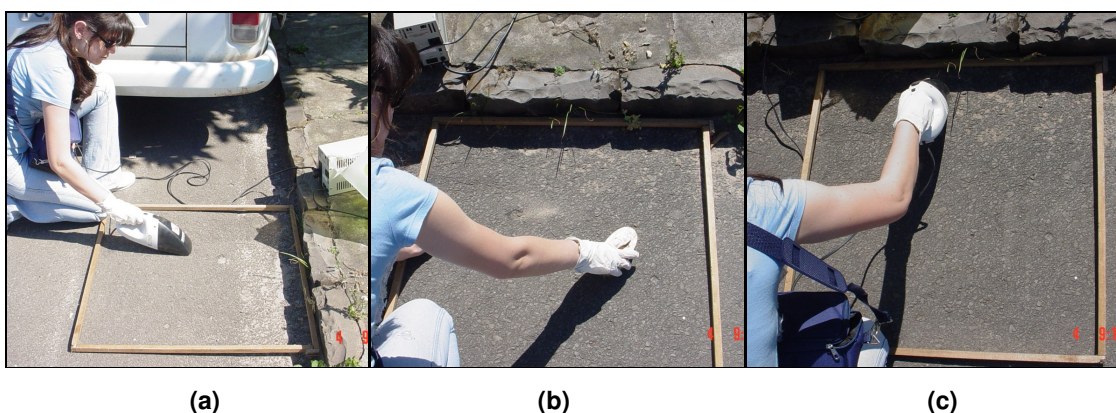
#### **4.2.2. Coleta de sedimento seco**

Os sedimentos secos foram coletados ao longo das sarjetas das ruas Marquês do Herval e Rigoberto Duarte durante três períodos através da utilização de um aspirador de pó conforme estudos já realizados (Butler et al., 1992; Deletic et al., 2000; Muthukaruppan et al., 2002 e Vaze e Chiew, 2002). O primeiro período de coleta ocorreu de 31 de março a 05 de maio, o segundo, de 31 de maio a 07 de julho, e o terceiro, de 24 de outubro a 19 de dezembro de 2005.

As áreas de estudos foram divididas em subáreas e a cada dia, aproximadamente no mesmo horário, as coletas foram realizadas em superfícies de 0,5 m<sup>2</sup> (0,707 m x 0,707 m) escolhidas por sorteio. Uma vez que a coleta ocorria em uma destas superfícies, ela só era aspirada novamente, se sorteada, após um evento de precipitação. A superfície a ser amostrada foi delimitada e isolada através de uma moldura de madeira.

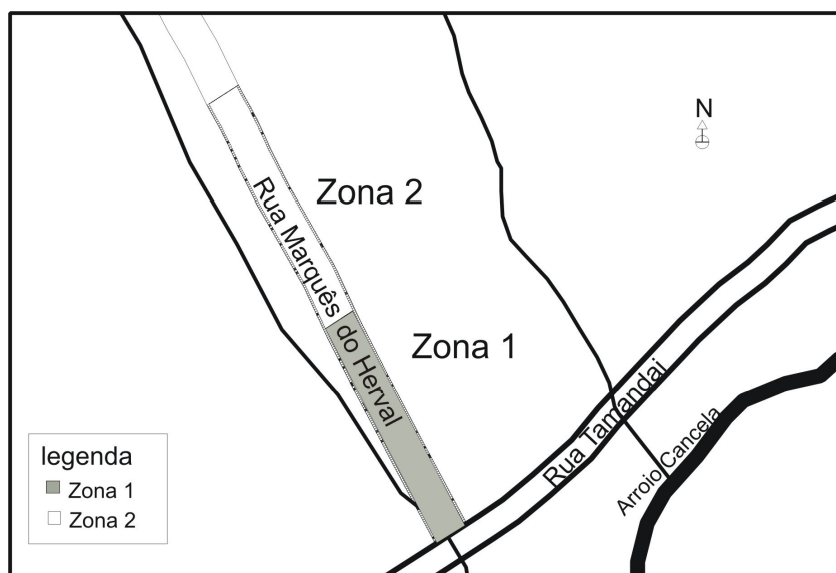


Dois tipos de cargas de poluentes foram coletadas seguindo a metodologia e as definições adotadas por Vaze e Chiew (2002). Primeiro, a superfície da rua foi aspirada conforme a Figura 4.3(a) sem nenhum processo prévio de preparação e a carga coletada foi definida como carga livre. Em seguida, a mesma superfície foi escovada utilizando-se uma escova de fibra para que então os poluentes finos agregados à superfície fossem soltos como ilustrado na Figura 4.3 (b) e (c). Esta segunda coleta foi caracterizada como a carga fixa.

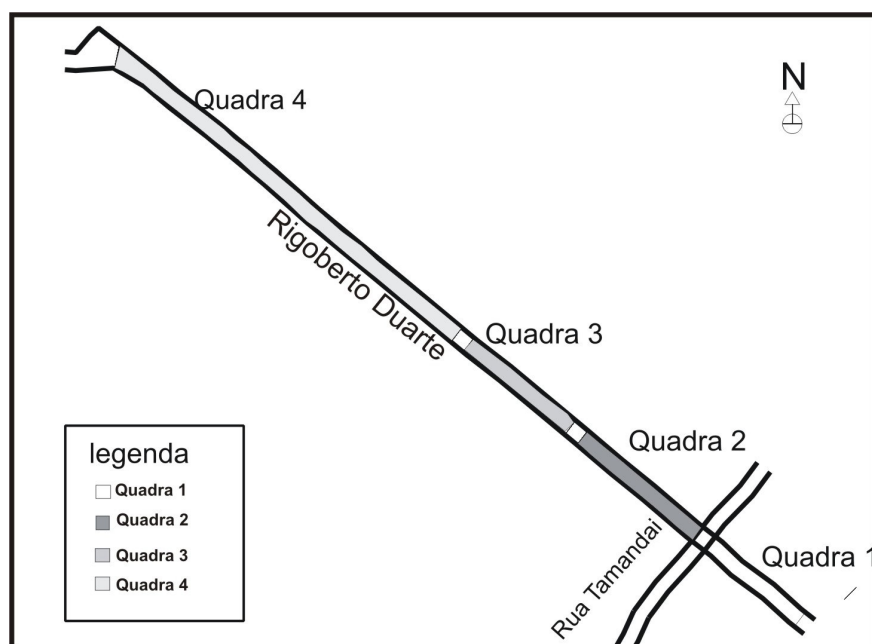


**Figura 4.3 - A área de amostragem isolada por uma moldura de madeira e (a) aspirada, (b) levemente escovada e (c) aspirada novamente.**

As coletas na rua Marquês do Herval (figura 4.4) foram realizadas na primeira quadra da rua, com 163,26 m de comprimento e 0,0531 m/m de declividade média. Com o objetivo de se obter uma amostra representativa, a quadra foi dividida em duas zonas, no sentido transversal, sendo sorteadas e coletadas amostras nas duas zonas.



**Figura 4.4 - Desenho esquemático com a disposição das duas zonas de amostragem da rua Marquês do Herval.**



**Figura 4.5 - Desenho esquemático com a disposição das quatro quadras de amostragem da rua Rigoberto Duarte.**



As coletas na rua Rigoberto Duarte foram realizadas ao longo de suas quatro quadras alternadamente, sendo que a cada experimento, duas delas eram amostradas. A primeira quadra possui 62,2 m de comprimento e 0,0767 m/m de declividade média, a segunda quadra possui 79,46 m de comprimento e 0,0960 m/m de declividade média, a terceira possui 68,93 m de comprimento e 0,1204 m/m de declividade média e a quadra final possui 222,49 m de comprimento e 0,1011 m/m de declividade média. A rua Rigoberto Duarte apresenta maior tráfego de veículos do que a rua Marquês do Herval, que encontra-se fora das principais rotas da cidade.

Dessa forma, foram obtidas oito amostras individuais para cada dia de coleta: quatro amostras representando a carga livre e quatro, a carga fixa referentes às duas áreas aspiradas em cada rua. Após serem quantificadas, as amostras fixas e livres de cada rua foram agrupadas para a determinação da distribuição granulométrica.

É muito importante mencionar que a intenção foi realizar um monitoramento contínuo durante cada período de amostragem. No entanto muitas dificuldades são enfrentadas quando se trata de trabalhos diários de campo. Problemas como a disponibilidade da equipe, e do meio de transporte utilizado para as coletas impediram que elas fossem contínuas. Defeitos mecânicos no aspirador utilizado na coleta também interromperam as coletas.

#### **4.2.3. Monitoramento hidrossedimentométrico**

O monitoramento hidrossedimentométrico ocorreu na estação implantada na saída da canalização coletora das águas pluviais da área de contribuição em torno da rua Marquês do Herval.

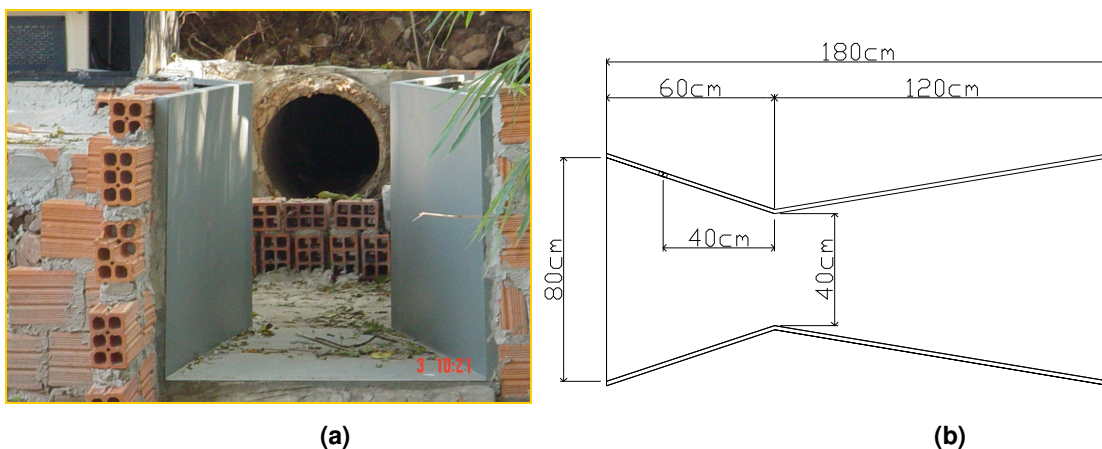
##### **4.2.3.1. Dados fluviométricos**

A estação fluviográfica Tamandaí localiza-se na rua Tamandaí, entre as ruas Duque de Caxias e Acre, nas coordenadas 29°42'06,4" S e 53°48'16,2" W, tendo início de operação em maio de 2005.

A estação foi equipada com uma calha e com um registrador de nível digital do tipo Thalimedes (OTT). O intervalo de tempo de registro do nível foi configurado em 1 minuto na ocorrência de variação no nível de no mínimo 1mm.

A calha utilizada neste experimento é uma calha de fundo plano, como a proposta por Scogerboe et al. (1972) *apud* Martins e Paiva (2001), que se difere da calha Parshall por apresentar fundo plano e por apresentar um estreitamento, localizado a um terço da borda inicial, para o qual convergem as extremidades.

As figuras a seguir apresentam um detalhamento e as dimensões da calha.



**Figura 4.6 - (a) Calha implantada na estação fluviossedimentométrica e (b) Planta baixa da calha.**

Para este tipo de calha, o escoamento nos medidores pode se dar em condições de fluxo livre ou fluxo submerso. No caso corrente tivemos fluxo livre, a vazão medida pela calha, em função do nível piezométrico medido na seção de entrada é dada por:

$$Q = C.h_a^{n_1} \quad (4.1)$$

onde:

$Q$  = vazão ( $m^3/s$ )

$h_a$  = profundidade na entrada da calha, medida na régua de montante do estreitamento

$n_1$  = expoente de fluxo livre, função do comprimento da calha

$C$  = coeficiente de fluxo livre, calculado por:

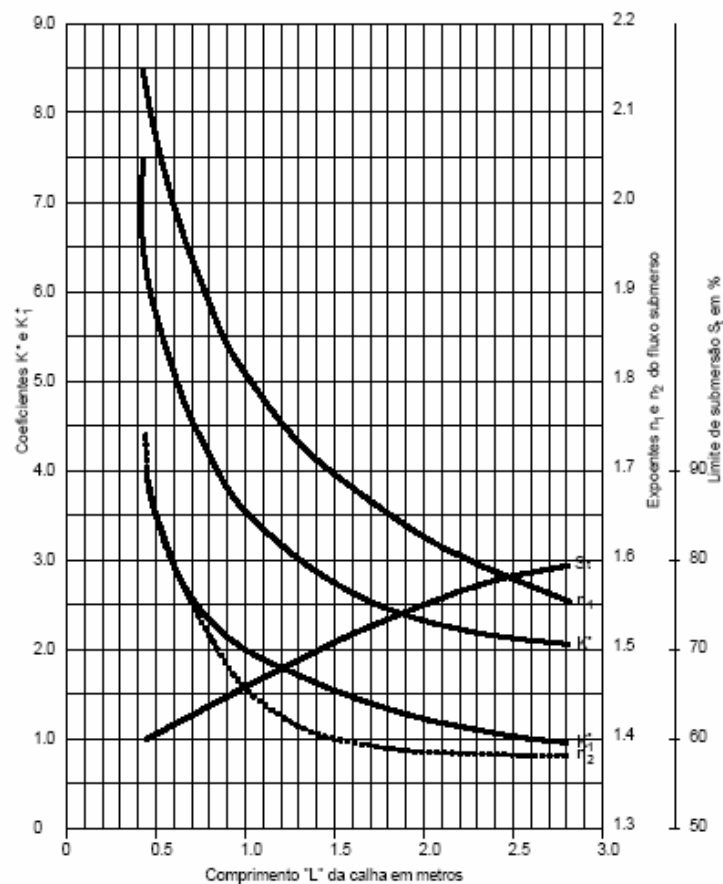
$$C = K^* . W^{1,025} \quad (4.2)$$

em que:

$W$  = largura do estreitamento (m)

$K^*$  = coeficiente função do comprimento da calha.

Foi adotada uma calha proposta por Alfaro (1974) *apud* Martins e Paiva (2001) de comprimento 1,80 m e largura do estrangulamento igual a 0,40 m para vazões entre 0,001 e 0,419 m<sup>3</sup>/s



**Figura 4.7 - Valores de  $K^*$ ,  $K_1^*$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  e grau limite de submersão para a calha medidora funcionando em condições de fluxo livre e submerso. Fonte: Alfaro (1974) *apud* Martins e Paiva (2001).**

Para equacionamento da calha, a partir do comprimento,  $L$ , e da figura 4.7 tem-se:

$$K^* = 2,45 \text{ e } n_1 = 1,65$$

$$C = 2,45 \cdot 0,40^{1,025} \rightarrow C = 0,958$$

$$Q = 0,958 \cdot h_a^{1,65} \quad (4.3)$$

Para a verificação do pleno funcionamento dos registros do Thalimedes (OTT) e do dimensionamento e execução da calha, foram realizadas algumas medições de vazão com a utilização do Nautilus, um sensor de velocidade baseado no princípio magnético indutivo. A figura 4.8 apresenta o sensor.



Figura 4.8 - Sensor de velocidades, Nautilus.

#### 4.2.3.2. Coleta de sedimento em suspensão

A coleta dos sedimentos em suspensão foi realizada com a utilização de um amostrador de água automático modelo ISCO FR7600, que foi instalado junto à calha a fim de coletar a mistura água e sedimento na saída da canalização, conforme a figura 4.9. O equipamento é composto por 24 garrafas plásticas com capacidade de 1000 mL, que ficam acondicionadas no interior do mesmo e é composto de 3 partes bem definidas: o painel de controle, a bomba de sucção e o refrigerador. Nesta pesquisa, o sistema de refrigeração não está sendo utilizado visto que as amostras são retiradas imediatamente após os eventos chuvosos sem necessidade de estocagem por um período de tempo maior.

O amostrador possui, no seu interior, um braço mecânico acoplado à mangueira que distribui o líquido succionado para dentro das garrafas de amostragem conforme a programação.

O funcionamento do amostrador é muito simples: um conduto com uma ponteira apropriada é colocado no ponto de coleta e é conectado à bomba de sucção do amostrador. Esta bomba é programada em intervalos predefinidos e a sucção é feita com a quantidade de água estabelecida na programação e distribuída no número de garrafas desejado com o auxílio do braço mecânico dentro do refrigerador. Após o término da amostragem, as garrafas são retiradas e encaminhadas para o laboratório para as análises posteriores.



**Figura 4.9 - Amostrador ISCO modelo FR7600 instalado na estação hidrossedimentométrica.**

Após a maioria dos eventos de precipitação foi verificada a acumulação de sedimentos na calha, logo na saída da canalização. Este material foi quantificado, e a sua distribuição granulométrica foi obtida através do ensaio de peneiramento e sedimentação.

#### **4.3. Análises de laboratório**

As análises de laboratório englobaram a determinação da carga e da distribuição granulométrica dos sedimentos encontrados nas sarjetas nos períodos secos e a determinação da concentração dos sedimentos e da distribuição

granulométrica das amostras coletadas nos eventos chuvosos.

#### **4.3.1. Análise dos sedimentos secos**

Os dados obtidos em campo foram utilizados para a quantificação e caracterização granulométrica do sedimento transportado ao longo das sarjetas, bem como para a análise da influência dos eventos de precipitação na acumulação dos sedimentos nas superfícies amostradas.

As oito amostras coletadas diariamente foram secas em estufa a 100° C por 24 horas para remover toda a umidade. Imediatamente depois de retirada da estufa, cada amostra foi pesada e em seguida as duas amostras diárias das cargas livres de cada rua foram misturadas. O mesmo ocorreu com as amostras das cargas fixas para a obtenção de uma amostra representativa para cada rua.

A determinação da distribuição granulométrica de cada amostra representativa foi feita por peneiramento. Foi utilizado um total de seis peneiras (0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1 e 2 mm). O sedimento retido em cada uma delas foi pesado.

A partir do procedimento acima, foi possível obter as curvas granulométricas indicando as porcentagens de areia e partículas grosseiras presentes em cada amostra. O material foi classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). A porção de material retida no prato, representando a porção de finos, não foi classificada para cada amostra, uma vez que se tratava de uma quantia muito pequena, em torno de 2%. Mesmo com pouca porcentagem de finos, as curvas granulométricas completas foram determinadas fazendo-se a junção das amostras representativas de cada período de amostragem e submetendo-as ao ensaio de peneiramento e sedimentação.

##### **4.3.1.1. Ensaio de peneiramento e sedimentação**

O ensaio de peneiramento e sedimentação foi realizado conforme as recomendações da NBR 7181/1984. Para a realização do ensaio, as amostras representativas das cargas livre e fixa de cada rua foram misturadas, a fim de se

obter uma quantia razoável para a determinação dos finos, uma vez que a granulometria das amostras diárias não apresentava a classificação dos finos.

O ensaio de peneiramento, específico para a porção de areia da amostra, é realizado após a amostra ser seca em estufa a 100° C por 24 horas. O material seco é então peneirado na peneira número 10 (2 mm). O material retido nesta peneira deve ser peneirado novamente nas peneiras 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm e 4,8 mm. O material passante é utilizado no ensaio de sedimentação.

Do material passante na peneira número 10, são retiradas 100 gramas, às quais são acrescentados 125 mL de defloculante (hexametáfosfato de sódio), utilizado para desagregar o material fino (silte e argila) das partículas maiores. A mistura decanta por 24 horas e em seguida é colocada no dispersor por 15 min. A amostra é transferida para uma proveta completando-se com água destilada até atingir o volume de um litro. Agita-se a mistura por 1 min e meio e realizam-se as leituras de densidade e temperatura durante os determinados tempos: 0,5, 1, 2, 4, 8, 15, 60, 120, 240, 1260 e 1440 minutos. À medida que as partículas vão se precipitando, a densidade da mistura vai diminuindo. Após a última leitura, o material é lavado e peneirado na peneira número 200 (0,075 mm). O material retido na peneira é seco em estufa a 100° C por 24 h. Depois de seco o sedimento é peneirado nas peneiras número 18, 35, 60, 120 e 230. Após todas as etapas experimentais concluídas, passa-se aos cálculos, a partir das leituras de densidade e temperatura lidas durante o ensaio. A figura 4.10 apresenta os equipamentos utilizados durante o ensaio de sedimentação.



**Figura 4.10 - Ensaio de sedimentação.**

A base teórica para o cálculo do diâmetro equivalente vem da lei de Stokes, que afirma que a velocidade de queda de uma partícula esférica, de peso específico conhecido, em um meio líquido, rapidamente atinge um valor, que é proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula. A partir deste princípio, adotou-se o seguinte procedimento de cálculo:

a) Cálculo da viscosidade do fluido dispersor em função das temperaturas ocorridas durante o ensaio:

$$\mu = \frac{0,0000181}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2} \quad (4.4)$$

b) Correção da leitura do densímetro no meio dispersor ( $Ld$ ):

$$Ld = -0,000004558347T^2 + 0,00000490095T + 1,00587579773 \quad (4.5)$$

c) Alturas de queda ( $h$ ):

$$h = 204,8 - 185L \quad (4.6)$$

$$h = 203,7 - 185L \quad (4.7)$$

Onde:

$L$  = leitura no densímetro

d) Diâmetro dos grãos ( $D$ ):

$$D = \sqrt{\frac{1800\mu h}{(\gamma_s - \gamma_w)t}} \quad (4.8)$$

Onde:

$\gamma_s$  = peso específico real dos grãos ( $\text{g/cm}^3$ )

$\gamma_w$  = peso específico do fluido ( $\text{g/cm}^3$ )

$\mu$  = viscosidade do meio ( $\text{g.s/cm}^2$ )

$T$  = temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

$D$  = diâmetro equivalente (mm)

$t$  = tempo de sedimentação (s)

$h$  = altura de queda

Porcentagem da amostra com partículas menores que o diâmetro equivalente:

$$\% < Diâm = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \frac{1000}{Ps} \frac{L - Ld}{\%pass\#10} \quad (4.9)$$



Onde:

$P_s$  = peso da amostra utilizada no ensaio de sedimentação

O traçado da curva é feito a partir dos diâmetros dos grãos no eixo das abscissas e as porcentagens das partículas menores do que os diâmetros considerados no eixo das ordenadas.

**Tabela 4.1 - Tabela modelo utilizada na análise granulométrica com o método de sedimentação.**

Sedimentação								
Massa Esp.sólidos (g/cm³): 2,650			Peso úmido (g): 100,00			Peso seco (g): 100,00		
Tempo Decorrido	Temperatura $T$ (°C)	Viscosidade $\mu$ (g.s/cm²)	Densidade $L$	Correção $L_d$	Altura Queda $h$ (cm)	Diâmetro $D$ (mm)	(% ) Amost. Total < Diâm.	
30 seg	18,8	1,0574E-05	1,0100	1,00436	17,95	0,0831	8,34	
1 min	18,8	1,0574E-05	1,0070	1,00436	18,51	0,0596	3,90	
2 min	18,8	1,0574E-05	1,0060	1,00436	18,69	0,0424	2,43	
4 min	18,8	1,0574E-05	1,0055	1,00436	17,68	0,0292	1,69	
8 min	18,8	1,0574E-05	1,0050	1,00436	17,78	0,0207	0,95	
15 min	18,8	1,0574E-05	1,0050	1,00436	17,78	0,0151	0,95	
30 min	18,4	1,0679E-05	1,0050	1,00442	17,78	0,0107	0,85	
60 min	17,8	1,0839E-05	1,0050	1,00452	17,78	0,0076	0,71	
120 min	17,2	1,1003E-05	1,0050	1,00461	17,78	0,0054	0,57	
240 min	16,6	1,1171E-05	1,0050	1,00470	17,78	0,0039	0,44	
1260 min	17,4	1,0948E-05	1,0050	1,00458	17,78	0,0017	0,62	
1440 min	16,0	1,1342E-05	1,0060	1,00479	17,59	0,0016	1,79	

#### 4.3.2. Análise das amostras líquidas

As amostras coletadas durante os eventos chuvosos foram utilizadas para a determinação da concentração de sedimentos e para a determinação das curvas granulométricas dos mesmos.

Desta forma, as amostras imediatamente após a coleta foram pesadas e reservadas em lugar seco e arejado.

Cada amostra de aproximadamente 1 L foi passada na peneira nº 230 para separação do material fino. O material retido na peneira foi submetido ao ensaio de peneiramento para a determinação das partículas com granulometria entre 0,063 e 2 mm. O material passante foi reservado e decantado por 48 horas. Para a determinação da concentração e granulometria do material fino (silte e argila), cada amostra foi reduzida a 900 mL para a determinação da concentração proporcional. A concentração proporcional é realizada retirando-se 25 mL da amostra homogeneizada e serve para a determinação do ensaio a ser realizado. Conforme

roteiro desenvolvido por Carvalho (1994) e utilizado pelo Laboratório CESP de Engenharia Civil, o ensaio de evaporação para a determinação da concentração é indicado para concentrações menores que 300 mg/L, e o método do tubo de retirada pelo fundo deve ser realizado quando a concentração proporcional apresentar-se entre 300 e 2000 mg/L.

#### **4.3.2.1. Evaporação**

O ensaio de evaporação é realizado após a decantação da amostra por 24 horas. Após este período, é importante que seja determinada a quantidade de sólidos dissolvidos presente na amostra. Para tanto, são retiradas duas pipetagens de 50 mL do sobrenadante.

O ensaio de evaporação consiste em retirar o excesso de líquido isento de sedimento e levar a amostra água-sedimento restante à estufa para posterior pesagem.

#### **4.3.2.2. Tubo de retirada pelo fundo**

O método do tubo pela retirada pelo fundo é utilizado para determinar a concentração e a distribuição granulométrica dos sólidos finos presentes em uma amostra. Tal ensaio é aplicado àquelas amostras que apresentam uma concentração proporcional entre 300 e 2000 mg/L.

Primeiramente, retiram-se duas amostras de 50 mL do sobrenadante da amostra a ser analisada a fim de determinar a concentração dos sólidos dissolvidos presentes. Em seguida faz-se a redução da amostra e inicia-se o ensaio.

O ensaio, que é feito a partir da precipitação do material e consiste em inserir a amostra em um tubo graduado até a marca de 100 cm, correspondente a 500 mL, agitar por 5 minutos e proceder as retiradas de 10 em 10 graduações nos tempos de 0,5, 1, 2, 5, 13, 32, 80, 160, 450 e 451 minutos. Para cada retirada, deve ser realizada a leitura da temperatura da água. As amostras retiradas são secas em estufa a 100° C por 24 horas e em seguida pesadas individualmente.



**Figura 4.11 - Ensaio do Tubo de Retirada pelo Fundo.**

A curva granulométrica é obtida graficamente, conforme descrito por Carvalho (1994), utilizando-se a curva de Oden, que é traçada a partir da porcentagem dos sedimentos em suspensão em função do tempo de deposição das partículas. Utiliza-se o artifício da superposição de valores na escala dos tempos, ou seja, a mesma escala variando em alguns limites, desta forma obtém-se curvas que fornecem bons pontos para o respectivo traçado.

A tabela a seguir é um modelo para uso na análise granulométrica com o método do tubo de retirada pelo fundo.

**Tabela 4.2 - Tabela modelo utilizada na determinação da concentração e análise granulométrica com o método do tubo de retirada pelo fundo.**

<i>Tubo de Remoção pela Base</i>									
<i>Altura da coluna:</i>	99,5	<i>divisões</i>	<i>Tubo nº:</i>	1	<i>sedim.em</i>	<i>tempo p/</i>	$\phi$	$\% < \phi$	<i>intervalo</i>
<i>temp.°C</i>	<i>(h:mm:ss)</i>	<i>alt.queda</i>	<i>becker</i>	<i>p. s.+ t.</i>	<i>tara (g)</i>	<i>suspens.</i>	<i>dep.100cm</i>		<i>(%)</i>
21,0	08:40:00	100,0	-	-	-	(%)	(min.)	(mm)	<i>sgr 0,0625</i>
21,0	08:40:30	90,0	51	44,0	44,0	100,0	0,0	0,0442	89,0
21,0	08:41:00	80,0	101	51,7	51,7	96,5	0,6	0,0312	83,1
21,0	08:42:00	70,5	105	44,8	44,8	95,2	1,3	0,0221	76,9
21,0	08:45:00	59,9	47	45,9	45,9	91,4	2,8	0,0156	70,7
21,0	08:53:00	49,9	110	45,3	45,3	87,5	8,3	0,0110	64,7
21,0	09:12:00	40,0	120	45,1	45,0	73,7	26,1	0,0078	59,3
21,0	10:10:00	30,0	55	46,8	46,8	57,9	80,0	0,0055	54,1
21,0	11:20:00	20,0	4	48,3	48,3	41,3	266,7	0,0039	49,5
21,0	16:10:00	9,9	8	50,2	50,2	35,5	800,0	<i>Areia =</i>	0,0 %
21,0	16:11:00	0,0	116	45,3575	45,4	56,7	4545,5	<i>Silte =</i>	50,5 %
<i>Coleta final (lavagem do tubo):</i>		54	49,2683	49,2636	Conc.:	110,23 mg/l	<i>Argila =</i>	49,5 %	9,8

#### 4.4. Carga de lavagem

A análise da ocorrência da carga de lavagem foi realizada conforme metodologia publicada por Gupta e Saul (1996) descrita no item 3.2.1. Uma vantagem do método é a possibilidade de estimar o tempo de ocorrência da carga de lavagem, o que é importante quando se trata do gerenciamento de águas urbanas.

#### 4.5. Aplicação à Modelagem

Foi realizado o ajuste da equação proposta por Sartor and Boyd (1972 e 1974) *apud* Deletic et al. (1997) mencionada no capítulo 3.

Lembrando que o modelo proposto considera:

$$M(T) = M_0 (1 - e^{-k(t_{dry} + t')}) \quad (4.10)$$

Onde:

M = quantidade de sólidos na superfície (g/m<sup>2</sup>)

T = período decorrente desde o início da primeira chuva da série (dia)

t<sub>dry</sub> = duração do período seco antecedente e

t' = período virtual (dia)

M<sub>0</sub> = a máxima quantidade de sólidos esperados na superfície (g/m<sup>2</sup>)

k = constante de acumulação (dia<sup>-1</sup>)

Os dados referentes aos dias secos compreendidos entre 09/04/05 e 05/05/05 foram utilizados para a calibração dos parâmetros M<sub>0</sub> e k da equação.

Os valores encontrados para os parâmetros calibrados e a aplicabilidade da equação de acumulação são discutidos no capítulo 5.

A equação de acumulação obtida para a rua Marquês do Herval foi utilizada para estimar as cargas nos dias antecedentes aos eventos de precipitação a fim de realizar as comparações entre os valores obtidos com a equação e as cargas decorrentes dos eventos.

## **5. RESULTADOS**

Neste capítulo são descritos os resultados das análises dos dados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa. São apresentados os seguintes aspectos:

- Os resultados das coletas de sedimentos durante os dias secos. As coletas foram realizadas durante três períodos de amostragem: (1) de 31/03/05 a 05/05/05; (2) de 31/05/05 a 07/07/05 e (3) de 24/10/05 a 19/12/04;
- O equacionamento do processo de acumulação dos sedimentos na superfície segundo a abordagem sugerida e publicada por Sartor and Boyd (1972 e 1974) apud Deletic et al. (1997);
- Resultados das medições de vazão durante alguns eventos de precipitação a fim de verificar o dimensionamento e construção da calha, bem como o funcionamento dos registros do Thalimedes (OTT), proporcionando a confecção da curva chave de vazões;
- Resultados das concentrações e cargas de sedimento obtidas através das campanhas realizadas entre maio de 2005 e dezembro de 2005.

### **5.1. Análise das amostras de sedimento seco**

As coletas de sedimento seco foram realizadas conforme descrito na metodologia e ocorreram durante três períodos de amostragem: (1) de 31/03/05 a 05/05/05; (2) de 31/05/05 a 07/07/05 e (3) de 24/10/05 a 19/12/04.

A figura 5.1 a mostra a área amostrada no dia 04/11.



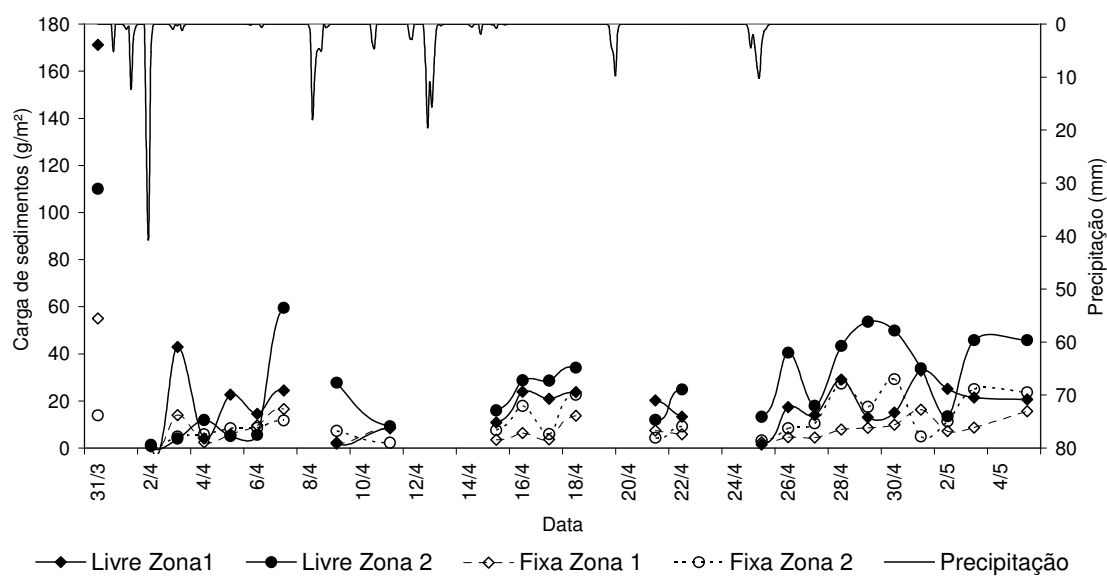
**Figura 5.1 - Local amostrado na rua Marquês do Herval dia 04/11/05.**

As amostras de sedimento seco, muitas vezes eram compostas também por material não particulado como lixo, vegetação, fibras ou cabelos, etc. Foi encontrado que a presença deste material é relativamente insignificante proporcionalmente a massa total de sedimentos, representando em média apenas 3%. As coletas realizadas em locais muito próximos a árvores e jardins apresentaram uma porcentagem maior de material não particulado em torno de 12%. Os valores são semelhantes às porcentagens encontradas por Butler & Clark (1995) em seus estudos em Lambeth na Inglaterra, que apresentaram valores de 2% e 10% para a média e para valor máximo em área muito arborizada, respectivamente.

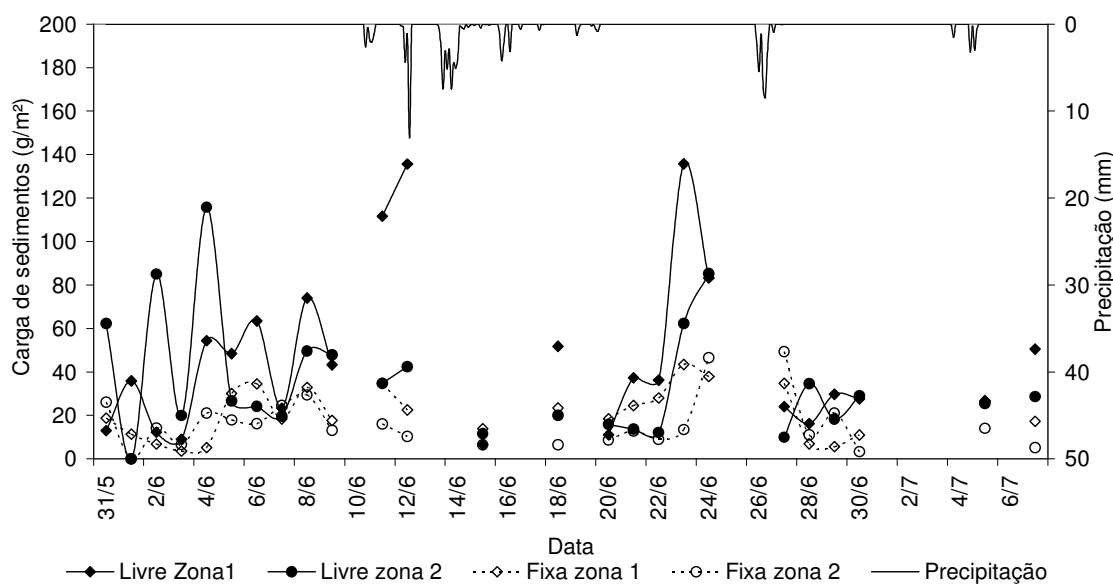
Após a quantificação dos sedimentos em laboratório, foram plotados gráficos a fim de avaliar a variação das cargas ao longo dos períodos de amostragem.

As Figuras 5.2 a 5.4 apresentam a variação das cargas livre e fixa coletadas ao longo das duas zonas da rua Marquês do Herval. As planilhas contendo os dados de precipitação e de carga de sedimento encontram-se no apêndice A. Os gráficos apresentam a distribuição temporal dos sedimentos na superfície ao longo dos períodos de coleta. Os valores de precipitação constantes nos gráficos correspondem às precipitações dicretizadas em duas horas. Nota-se claramente que esta distribuição não é uniforme ao longo dos períodos secos.

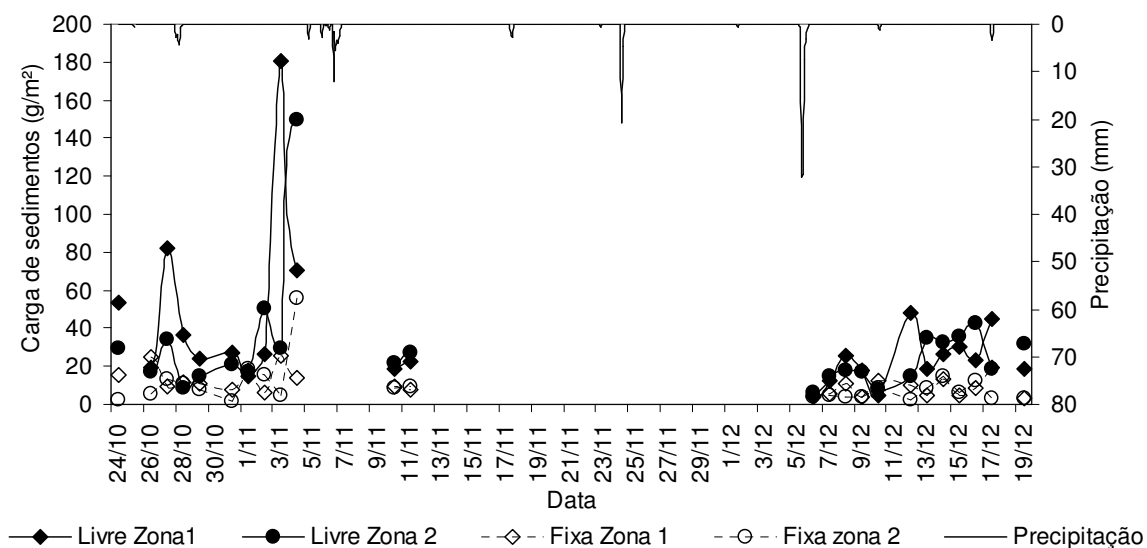
As diferenças são menores nas quantidades referentes à carga fixa, uma vez que a carga fixa está parcialmente agregada à superfície enquanto a carga livre pode ser redistribuída mais facilmente pelo vento, pelo tráfego e por outros fatores.



**Figura 5.2 - Cargas livre e fixa coletadas das duas zonas de amostragem da rua Marquês do Herval durante o primeiro período de amostragem.**



**Figura 5.3 - Cargas livre e fixa coletadas das duas zonas de amostragem da rua Marquês do Herval durante o segundo período de amostragem.**



**Figura 5.4 - Cargas livre e fixa coletadas das duas zonas de amostragem da rua Marquês do Herval durante o terceiro período de amostragem.**

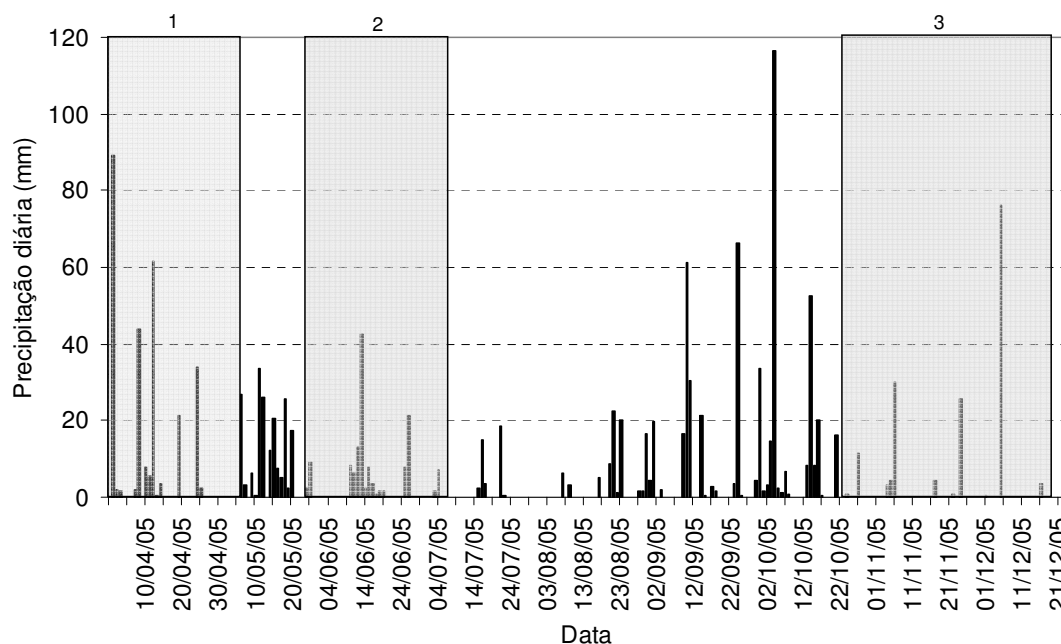
### 5.1.1. Efeito da Precipitação nas Cargas de Sedimentos

Alguns eventos significativos de precipitação ocorreram durante os períodos de coletas. A figura 5.5 apresenta o gráfico com as precipitações diárias no período monitorado, com destaque em cinza, para os períodos em que as coletas de sedimento seco foram realizadas.

O evento do dia 1º/04 foi o maior e mais longo registrado no primeiro período de coleta, ocorrendo durante todo o dia, a precipitação do dia 12/04 teve semelhante duração. As precipitações dos dias 08/04 e 19/04 ocorreram durante toda a manhã dos referidos dias, impossibilitando a coleta de sedimento seco que ocorreu diariamente no período da manhã. O evento do dia 24/04 teve início no final da manhã durando toda a tarde.

O segundo período de amostragem ocorreu durante o inverno e foi caracterizado por um período chuvoso entre 10/06 e 19/06. O evento registrado no dia 03/07 ocorreu durante à tarde e foi seguido pelo registrado dia 04/07 durante os períodos da manhã e tarde.



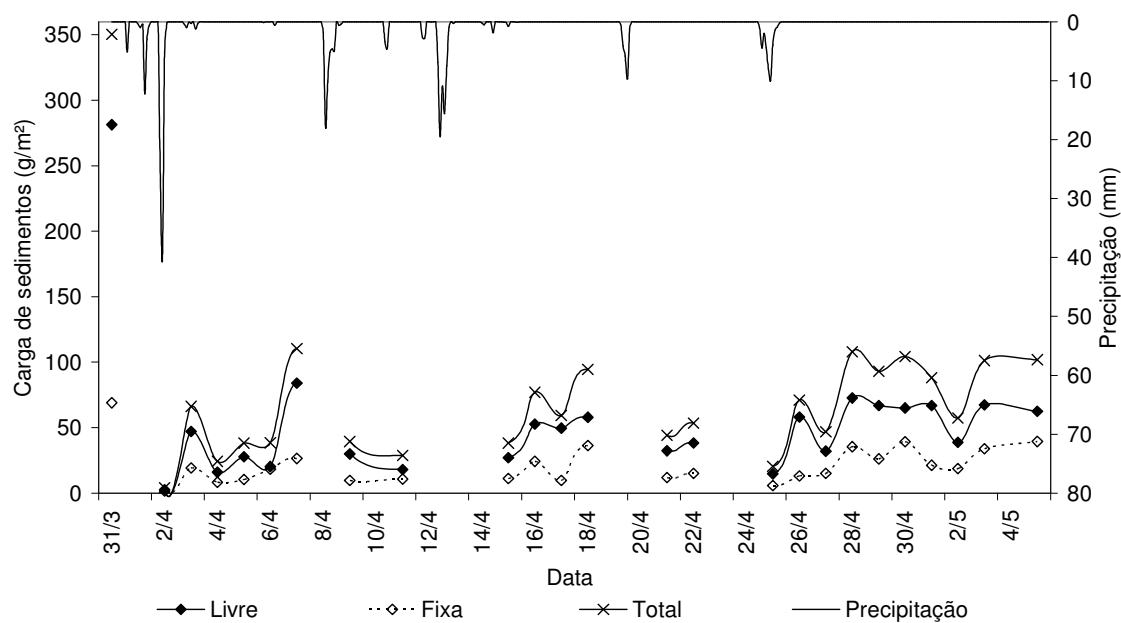


**Figura 5.5 - Valores da precipitação diária na estação pluviográfica Sest Senat no período monitorado.**

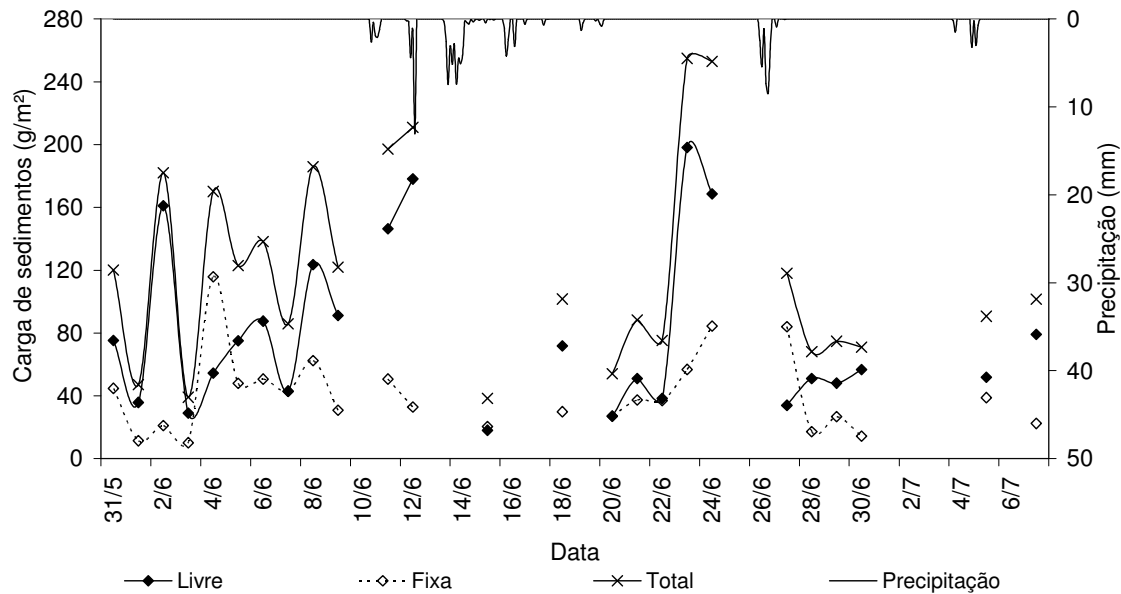
O terceiro período de amostragem ocorreu durante a primavera. O evento registrado no dia 27/10 ocorreu durante à tarde não impedindo a coleta de sedimento seco pela manhã. O evento do dia 5/12 foi o maior registrado no período ocorrendo durante toda a manhã.

A seguir descreve-se a influência das intensidades desses eventos nas quantidades de sedimento coletado.

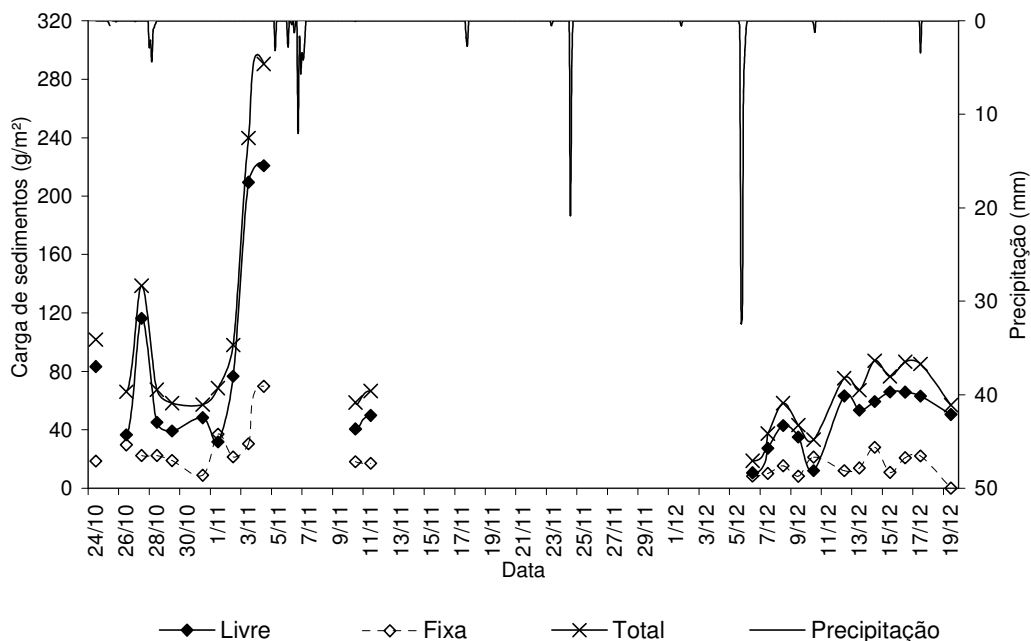
As Figura 5.6 a 5.8 apresentam a variação das cargas fixa, livre, total e da precipitação ao longo dos dias de coleta de sedimentos nas sarjetas da rua Marquês do Herval. Os gráficos mostram que a carga total de sedimentos diminuiu após a maioria dos eventos de precipitação acima mencionados, porém aumentou depois da precipitação registrada às 6 horas do dia 06/04 (0,61 mm). Desconsiderando o período chuvoso acima mencionado, a carga livre diminuiu após todos os eventos de precipitação. A carga fixa manteve-se aproximadamente constante após os eventos de precipitação, porém aumentou após a precipitação do dia 06/04. Neste caso, o aumento da carga fixa é maior que a diminuição da carga livre resultando em um pequeno aumento da carga total.



**Figura 5.6 - Cargas livre e fixa e total da rua Marquês do Herval ao longo do primeiro período de amostragem.**



**Figura 5.7 - Cargas livre e fixa e total da rua Marquês do Herval ao longo do segundo período de amostragem.**



**Figura 5.8 - Cargas livre e fixa e total da rua Marquês do Herval ao longo do terceiro período de amostragem.**

Dependendo da intensidade e da duração de cada evento de precipitação, parte dos sedimentos presentes na superfície pode se desagregar ou se dissolver. Pequenos eventos desagregam principalmente a carga livre, enquanto que eventos maiores podem desintegrar também a carga fixa. Dependendo da capacidade de transporte do escoamento, parte destes sedimentos em suspensão é removida da superfície. O remanescente torna-se parte da carga fixa, uma vez que acaba se fixando à superfície após o término do escoamento ao longo da sarjeta e após a secagem da superfície.

Após o evento do dia 08/04, a capacidade de transporte do escoamento foi suficiente para carrear a maior parte dos sedimentos desagregados e/ou dissolvidos. Nesse caso, devido à sua intensidade e a longa duração do evento, parte da carga fixa também foi removida. Esse processo deveria resultar numa diminuição da carga fixa, porém durante o processo de secagem da superfície, parte da carga livre pode ter sido agregada contribuindo para a quantidade de sedimentos da carga fixa. Isso explica por que há uma redução significativa da carga livre depois do evento em questão com uma pequena variação da carga fixa. O mesmo parece ocorrer para os

eventos mais significativos de precipitação.

Devido à baixa intensidade da precipitação no evento do dia 06/04, apenas parte da carga livre se desintegra. O escoamento remove apenas uma pequena quantia destes sedimentos. O restante acaba se agregando à superfície como carga fixa. Isso explica a pouca variação da carga livre e o aumento da carga fixa após o referido evento. Foi constatado que, em geral, os eventos com intensidade menor que 1,0 mm/h resultam num aumento da carga total na superfície.

O período chuvoso compreendido entre 10/06 e 19/06 possibilitou apenas algumas coletas de sedimentos seco, não permitindo uma análise representativa do período, uma vez que o processo de acumulação dos sedimentos na superfície ocorre ao longo de períodos secos.

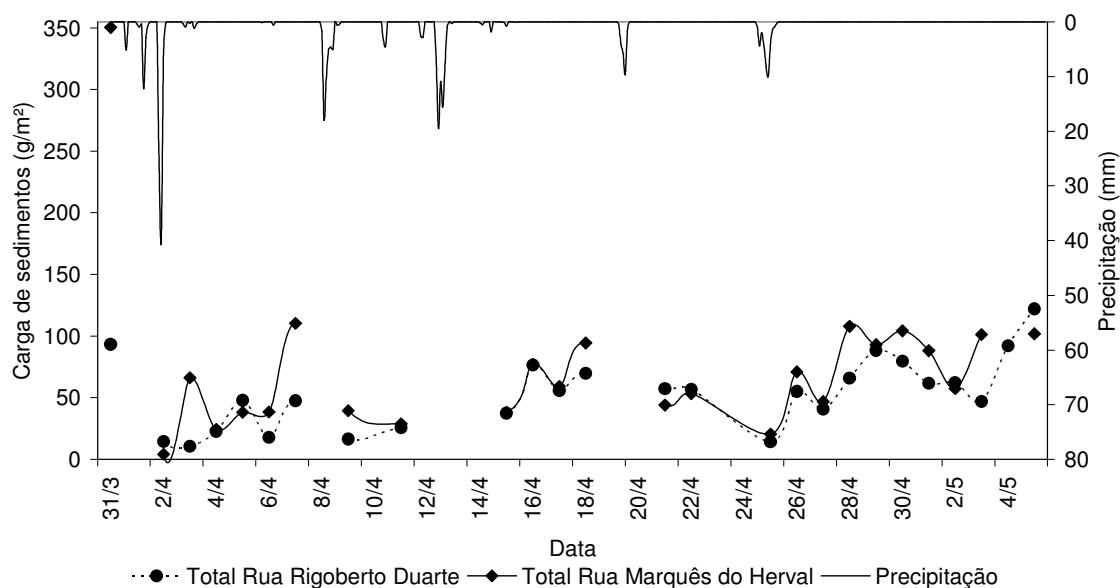
As Figuras 5.9 a 5.11 apresentam os gráficos das cargas totais coletadas nas duas ruas. O comportamento das cargas de sedimento frente aos eventos de precipitação é semelhante. Como mencionado anteriormente, há uma variação nas quantidades de sedimentos aspirada em cada dia, enfatizando a conclusão de Vaze e Chiew (2002) de que o processo de acumulação de sedimentos ocorre relativamente rápido. No entanto, os dados analisados por Vaze e Chiew (2002) e neste trabalho apresentaram grande variabilidade para concluir se a acumulação rápida e a redistribuição dos sedimentos resultam em uma quantia semelhante de sedimentos ao longo do tempo.

As cargas de sedimentos totais variaram de 4 a 350 g/m<sup>2</sup> na rua Marquês do Herval e de 10 a 240 g/m<sup>2</sup> na rua Rigoberto Duarte. Ambas as ruas apresentaram em média aproximadamente 60 g/m<sup>2</sup>. Comparando-se com os valores encontrados por Vaze e Chiew (2002) em uma rua de um bairro residencial em Melbourne, Austrália, que variaram de 10 a 60 g/m<sup>2</sup>, pode-se concluir que as ruas amostradas no presente trabalho apresentam cargas maiores de sedimentos em suas superfícies, o que pode ser influenciado pelo fato de que as ruas estudadas por Vaze e Chiew (2002) apresentavam limpeza periódica, enquanto as ruas aqui monitoradas não apresentam nenhum processo de limpeza periódico.

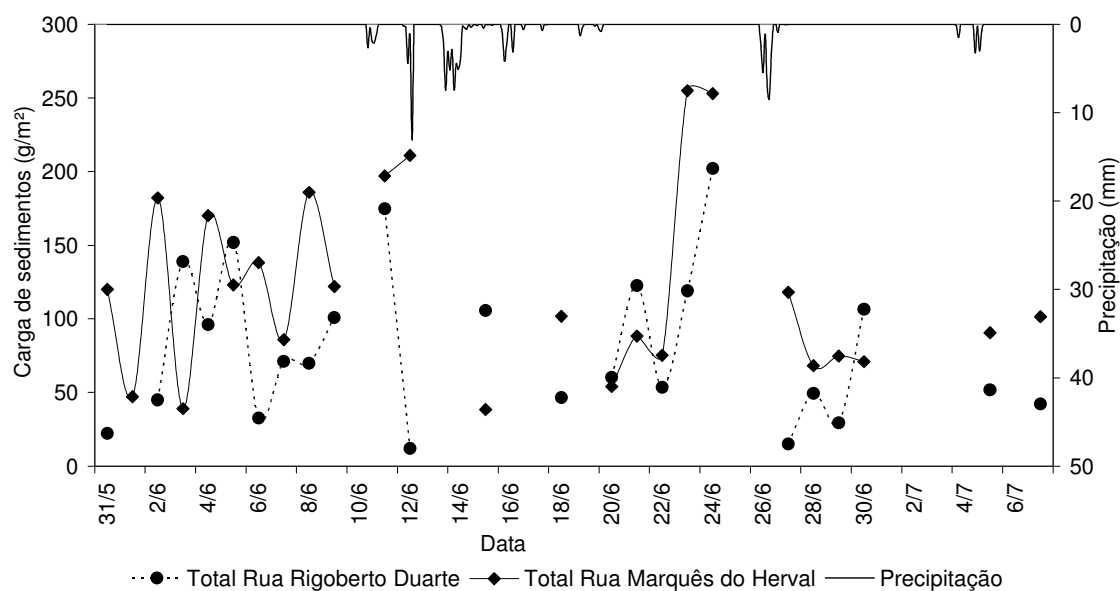
No trabalho de Vaze e Chiew (2002), as cargas sofreram em média uma redução de 40% após dois eventos significativos de precipitação.

Durante o período de coletas nas ruas Marquês do Herval e Rigoberto Duarte

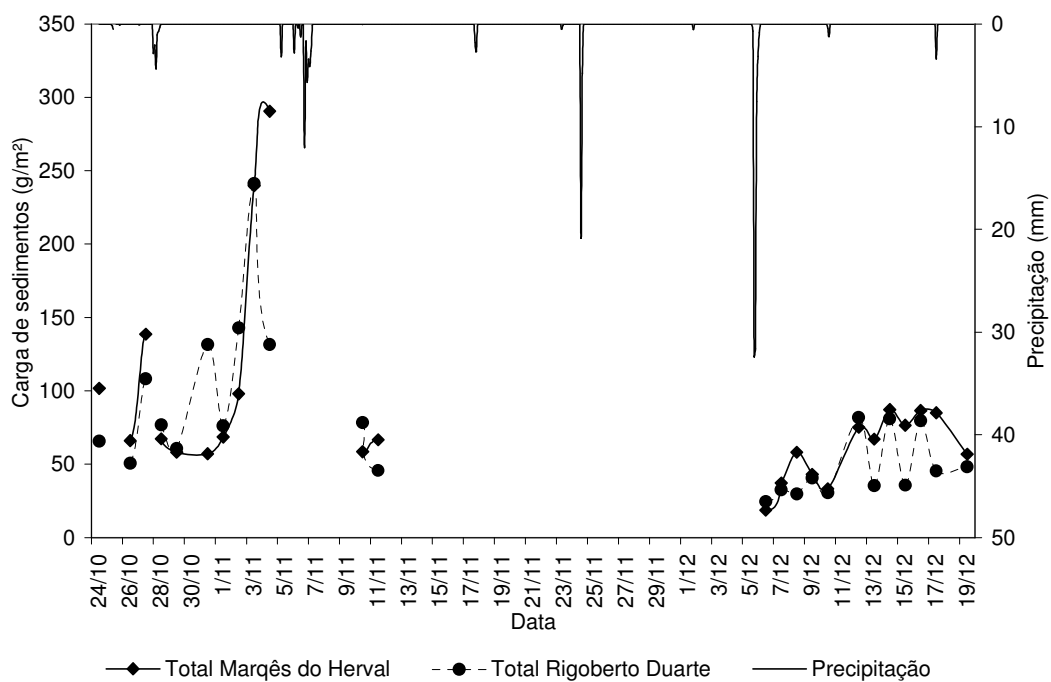
ocorreram alguns eventos de diferentes durações e intensidades contribuindo significativamente para uma redução não uniforme da carga de sedimentos na superfície. Foram registradas reduções variando de 17 a 98% após os eventos. As reduções de 98 e 84% para a rua Marquês do Herval e Rigoberto Duarte, respectivamente, ocorreram após o maior registro pluviométrico de 89,23 mm no dia 1º/04. As outras reduções observadas variam em média de 50 a 65%, mostrando que as cargas geralmente reduzem, mas não zeram após os eventos de precipitação.



**Figura 5.9 - Cargas totais coletadas das duas ruas durante o primeiro período de amostragem.**



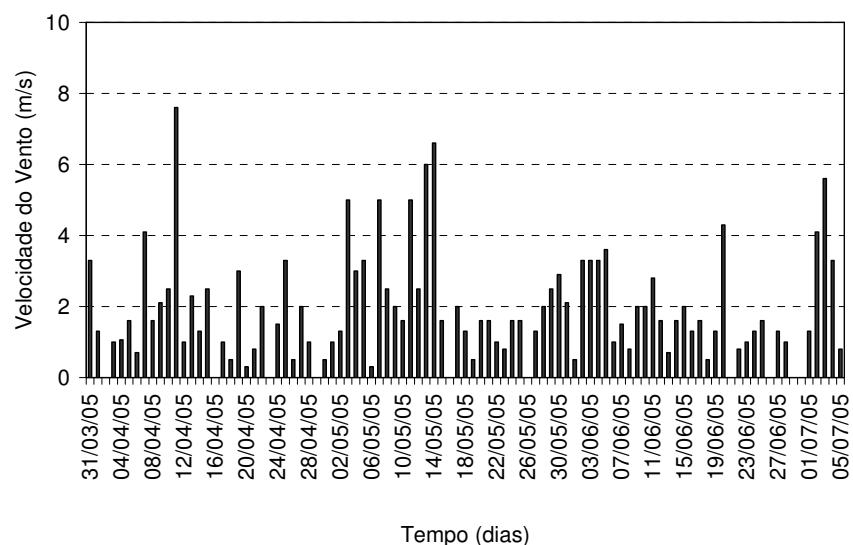
**Figura 5.10 - Cargas totais coletadas das duas ruas durante o segundo período de amostragem.**



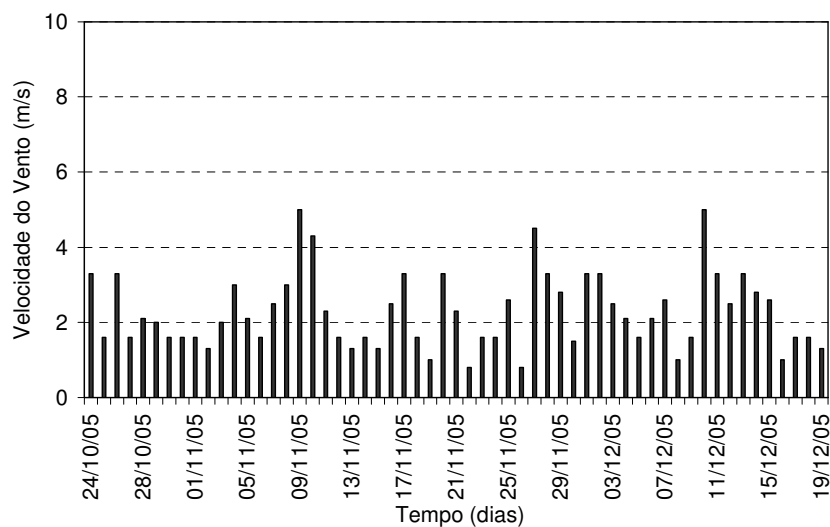
**Figura 5.11 - Cargas totais coletadas das duas ruas durante o terceiro período de amostragem.**

### 5.1.2. Efeito da Velocidade do Vento nas Cargas de Sedimentos

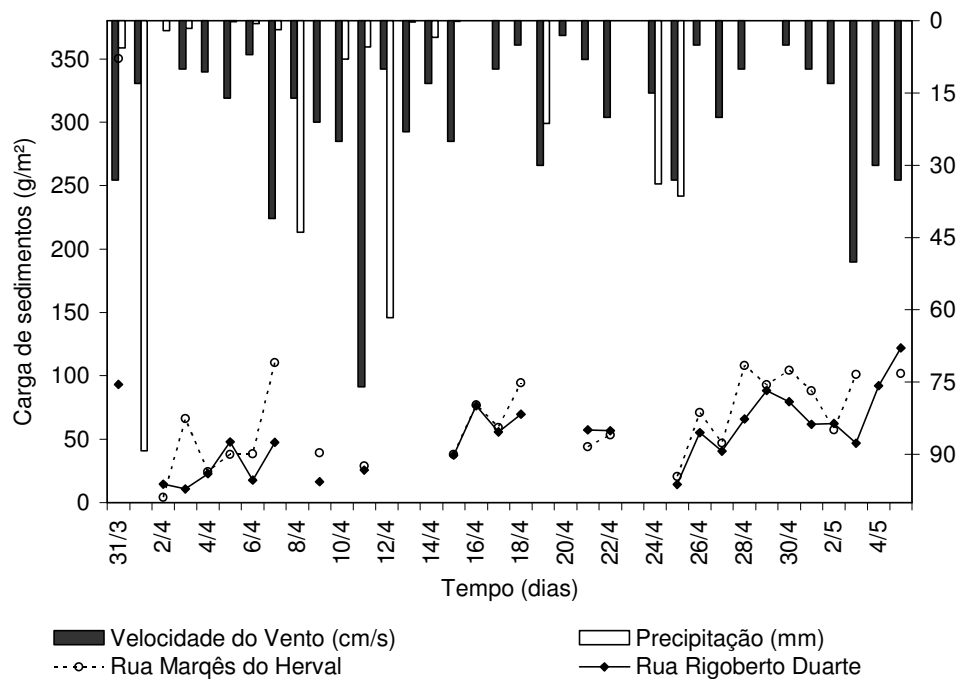
Os dados de velocidade do vento foram obtidos na Estação Meteorológica do Departamento de Fitotecnia, localizada no campus da Universidade Federal de Santa Maria. Foram utilizados os dados diários de velocidade registrados às 9 horas a 10 m de altura a fim de realizar uma análise do efeito da velocidade do vento na carga de sedimentos presente nas superfícies. As figuras 5.12 e 5.13 apresentam os valores diários da velocidade do vento registrados durante os períodos de monitoramento.



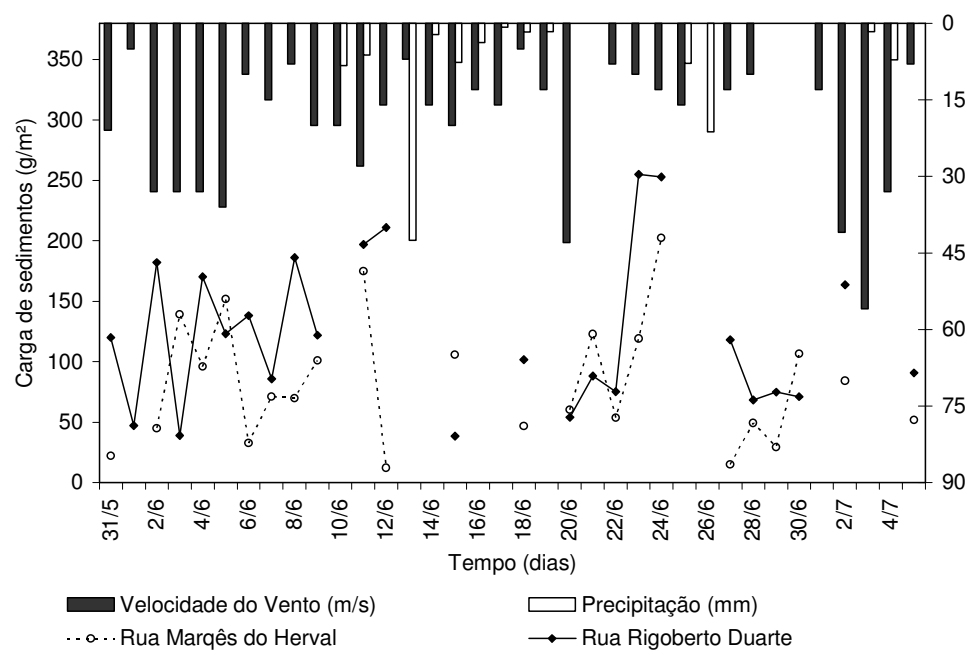
**Figura 5.12 - Valores diários da velocidade do vento registrados no período de 31/03/2005 a 05/07/2005.**



**Figura 5.13 - Valores diários da velocidade do vento registrados no período de 24/10/2005 a 19/12/2005.**

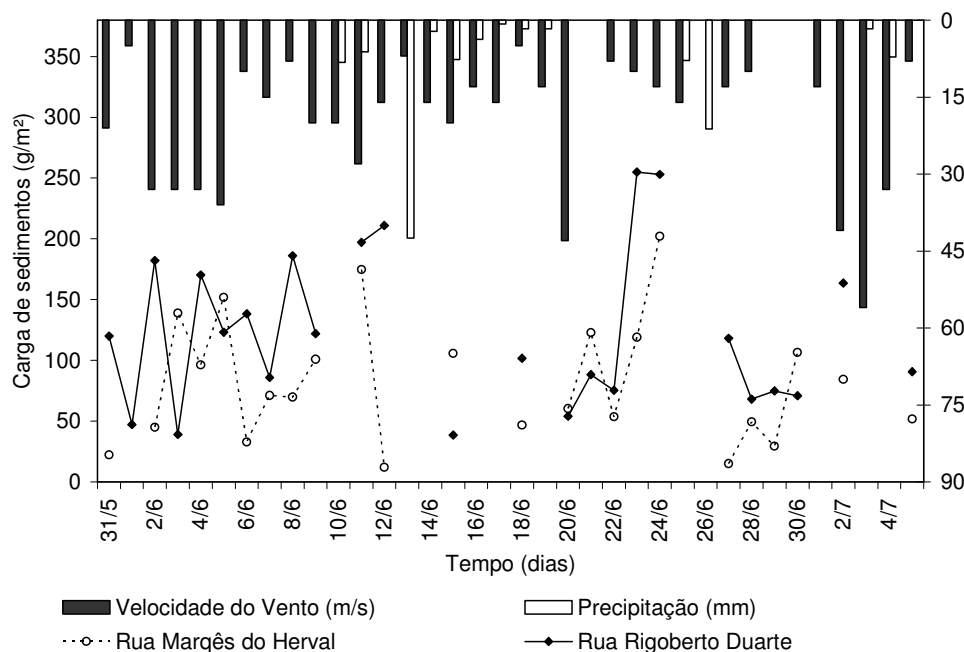


**Figura 5.14 - Efeito da velocidade do vento e precipitação na carga total de sedimentos na superfície - Primeiro período de amostragem.**





**Figura 5.15 - Efeito da velocidade do vento e precipitação na carga total de sedimentos superfície - Segundo período de amostragem.**



**Figura 5.16 - Efeito da velocidade do vento e precipitação na carga total de sedimentos superfície - Terceiro período de amostragem.**

Busca-se através da análise da velocidade do vento encontrar algumas explicações quanto ao comportamento extremamente não uniforme do processo de acumulação de sedimentos na superfície.

No primeiro período a velocidade do vento variou de 0 a 7,6 m/s, com um valor médio de 1,77 m/s e desvio padrão de 2,1.

No dia 11/04/05 a velocidade do vento apresentou um pico atingindo 7,6 m/s, porém a redução da carga de sedimentos na superfície no dia 09/04 foi resultado do efeito associado do vento e principalmente da precipitação registrada no dia 08/04.

No segundo período de amostragem a velocidade do vento variou de zero m/s a 5,6 m/s apresentando um valor médio de 1,76 m/s com um desvio padrão de 1,38.

Apesar da velocidade do vento ter apresentado um valor praticamente constante de 2,14 m/s durante o período seco de 31/05 a 09/06, houve grande variação na carga de sedimentos, chegando a apresentar comportamentos opostos

entre as duas ruas analisadas, comportamento este não apresentado no primeiro período de análises, onde os valores de carga de sedimentos conservaram certa proporcionalidade entre ambas as ruas. Analisando a direção da velocidade do vento entre os dias 31/05 a 09/06, notou-se que a mesma alternou entre todas as direções acarretando uma redistribuição das partículas de forma não uniforme. O comportamento crescente esperado da carga de sedimentos em períodos secos foi substituído por um comportamento aleatório em ambas as ruas.

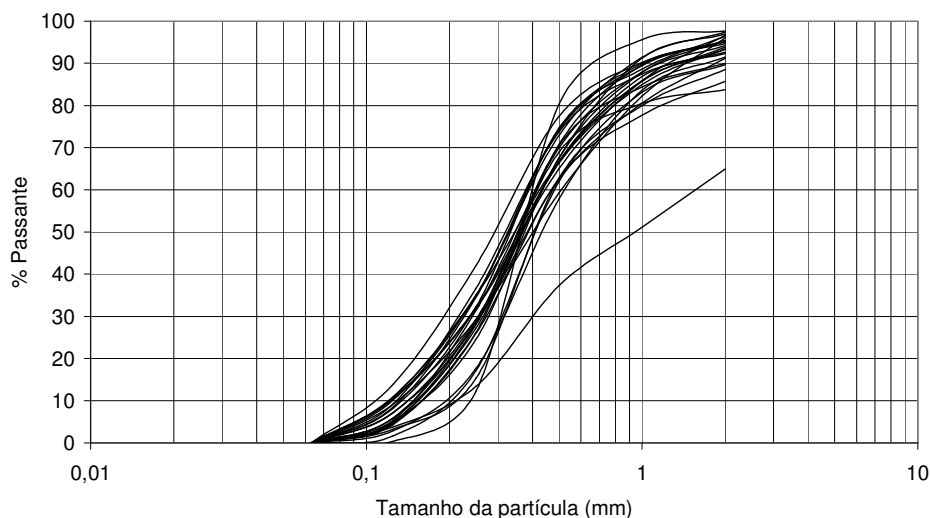
No terceiro período de amostragem a velocidade do vento variou de 0,8 m/s a 5 m/s apresentando um valor médio de 2,28 m/s e um desvio padrão de 1.

A distribuição temporal dos sedimentos é muito irregular, e muitos fatores influenciam na redistribuição das partículas na superfície, não permitindo conclusões mais significativas da ação isolada do vento sobre esta.

A distância, de aproximadamente 10 km, da estação meteorológica da área de monitoramento dificulta a tarefa de analisar a influencia da velocidade do vento na redistribuição dos sedimentos.

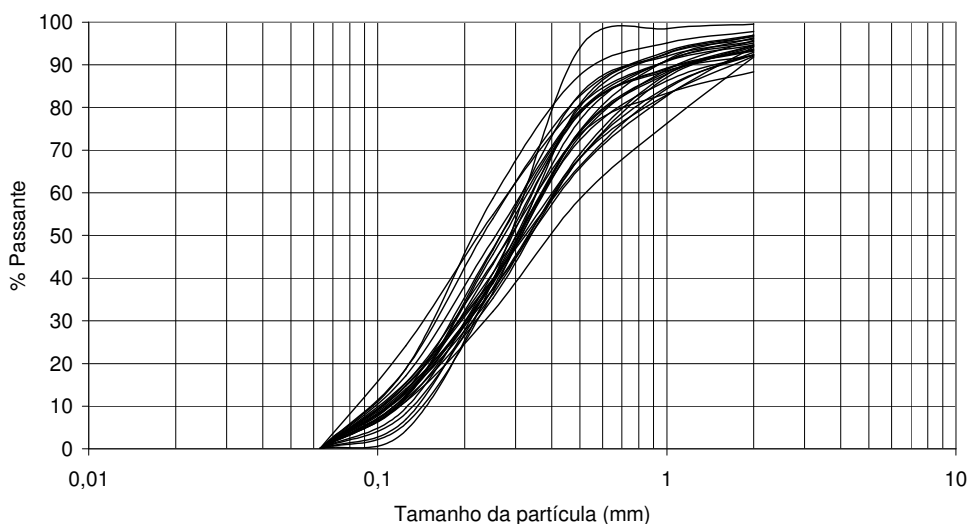
### **5.1.3. Distribuição Granulométrica dos Sedimentos**

As Figuras 5.17 a 5.20 apresentam a distribuição granulométrica das amostras coletadas na rua Marquês do Herval e na rua Rigoberto Duarte durante o primeiro período de amostragem. Nota-se que há variação no tamanho das partículas das cargas livre e fixa, mas que em geral, suas características são semelhantes. As análises indicam que quase todo o sedimento constituinte da carga livre é mais fino que 2 mm, 70 % é mais fino que 1 mm e praticamente 5 % é mais fino que 0,2 mm. Semelhante às partículas da carga livre, quase todo sedimento constituinte da carga fixa é mais fino que 2 mm, por outro lado 15% dele é mais fino que 0,2 mm. Como esperado, os sedimentos constituintes da carga fixa são mais finos do que aqueles da carga livre.

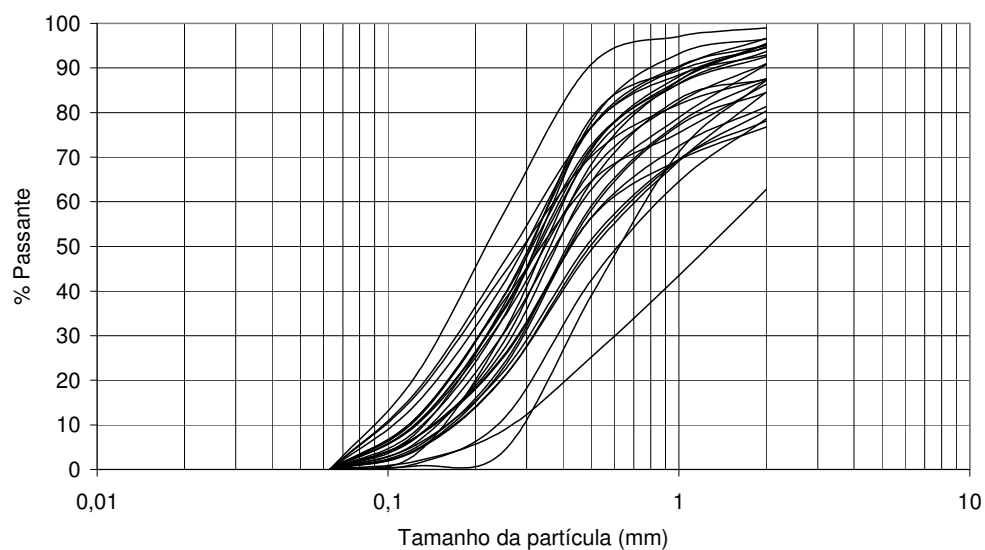


**Figura 5.17 - Distribuição granulométricas da carga livre referente ao primeiro período de amostragem da Rua Marquês do Herval.**

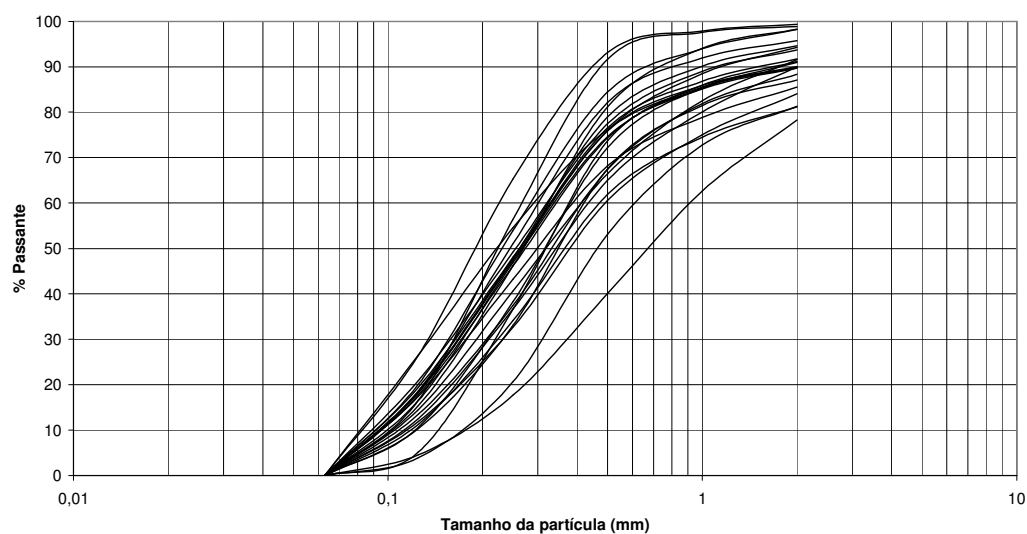
A curva destoante na figura 5.17 representa a curva granulométrica da carga livre no dia 09/04 na rua Marquês do Herval.. Nota-se que o material constituinte da carga livre neste dia apresentou-se mais grosseiro ( $d_{50}=0,9$  mm). O acréscimo de areia grossa na amostra pode ser explicado pela presença de obras de reparos da calçada muito próximas ao local de amostragem do dia em questão.



**Figura 5.18 - Distribuição granulométricas da carga fixa referente ao primeiro período de amostragem da Rua Marquês do Herval.**



**Figura 5.19 - Distribuição granulométricas da carga livre referente ao primeiro período de amostragem da Rua Rigoberto Duarte.**

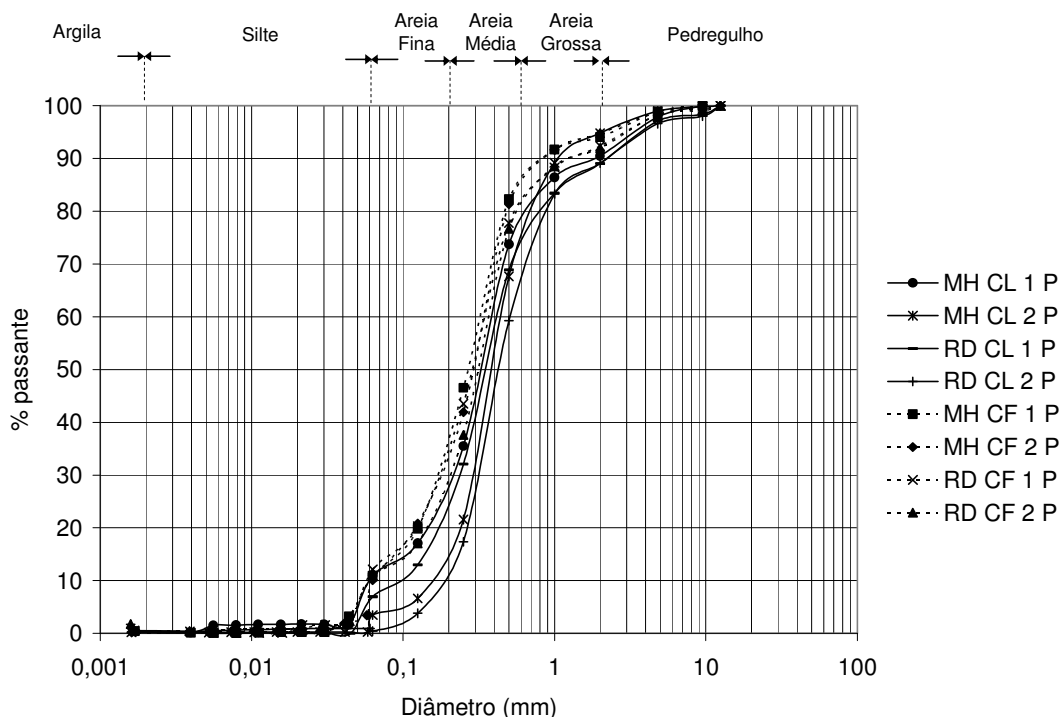


**Figura 5.20 - Distribuição granulométricas da carga fixa referente ao primeiro período de amostragem da Rua Rigoberto Duarte.**

As curvas referentes às amostras coletadas no segundo e terceiro período de amostragem são apresentadas no apêndice B.

Os ensaios de peneiramento e sedimentação realizados para a determinação

das curvas granulométricas das amostras totais dos dois primeiros períodos de amostragem mostraram que a maior parte do material analisado é constituída por areia média, conforme as curvas apresentadas na figura 5.21 a seguir.



#### Legenda:

MH CL 1P - Carga livre da rua Marquês do Herval no primeiro período de amostragem;  
 MH CL 2P - Carga livre da rua Marquês do Herval no segundo período de amostragem;  
 RD CL 1P - Carga fixa da rua Rigoberto Duarte no primeiro período de amostragem;  
 RD CL 2P - Carga livre da rua Rigoberto Duarte no segundo período de amostragem;  
 MH CF 1P - Carga fixa da rua Marquês do Herval no primeiro período de amostragem;  
 MH CF 2P - Carga fixa da rua Marquês do Herval no primeiro período de amostragem;  
 RD CF 1P - Carga fixa da rua Rigoberto Duarte no primeiro período de amostragem;  
 RD CF 2P - Carga fixa da rua Rigoberto Duarte no segundo período de amostragem;

**Figura 5.21 - Distribuição granulométricas resultantes do ensaio de peneiramento e sedimentação.**

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam um resumo da distribuição granulométrica dos sedimentos resultantes dos ensaios de peneiramento e sedimentação.

**Tabela 5.1 - Distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga livre - Ensaio de peneiramento e sedimentação.**

Composição	MH CL 2P	MH CL 1P	RD CL 2P	RD CL 1P
<b>Argila (%)</b>	0	0	1	0
<b>Silte (%)</b>	0	1	0	0
<b>Areia Fina (%)</b>	10	24	7	20
<b>Areia Média (%)</b>	57	49	51	49
<b>Areia Grossa (%)</b>	27	17	30	20
<b>Pedregulho (%)</b>	5	9	11	11

Legenda:

MH CL 2P – Carga livre da rua Marquês do Herval no segundo período de amostragem;

MH CL 1P – Carga livre da rua Marquês do Herval no primeiro período de amostragem;

RD CL 2P – Carga livre da rua Rigoberto Duarte no segundo período de amostragem;

RD CL 1P – Carga fixa da rua Rigoberto Duarte no primeiro período de amostragem.

**Tabela 5.2 - Distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga fixa - Ensaio de peneiramento e sedimentação.**

Composição	MH CF 2P	MH CF 1P	RD CF 2P	RD CF 1P
<b>Argila (%)</b>	0	0	1	0
<b>Silte (%)</b>	2	2	1	1
<b>Areia Fina (%)</b>	32	29	23	29
<b>Areia Média (%)</b>	48	52	52	48
<b>Areia Grossa (%)</b>	13	12	15	15
<b>Pedregulho (%)</b>	5	6	8	8

Legenda:

MH CF 2P – Carga fixa da rua Marquês do Herval no segundo período de amostragem;

MH CF 1P – Carga fixa da rua Marquês do Herval no primeiro período de amostragem;

RD CF 2P – Carga fixa da rua Rigoberto Duarte no segundo período de amostragem;

RD CF 1P – Carga fixa da rua Rigoberto Duarte no primeiro período de amostragem.

As médias ponderadas dos diâmetros médios ( $d_{50}$ ) das amostras totais mostradas na Tabela 5.3 a seguir podem ser comparadas com os valores encontrados em outros estudos conforme a Tabela 3.1 no capítulo 3. Uma breve análise permite concluir, que ambas as ruas apresentaram partículas menores do que os estudos apresentados por Butler e Clark (1995) e Deletic et al. (2000).

**Tabela 5.3 - Diâmetro médio ( $d_{50}$ ) dos sedimentos secos encontrados nesta pesquisa**

Local de Amostragem	$d_{50}$ (mm)
Rua Marques do Herval	≈ 0,350
Rua Rigoberto Duarte	≈ 0,350

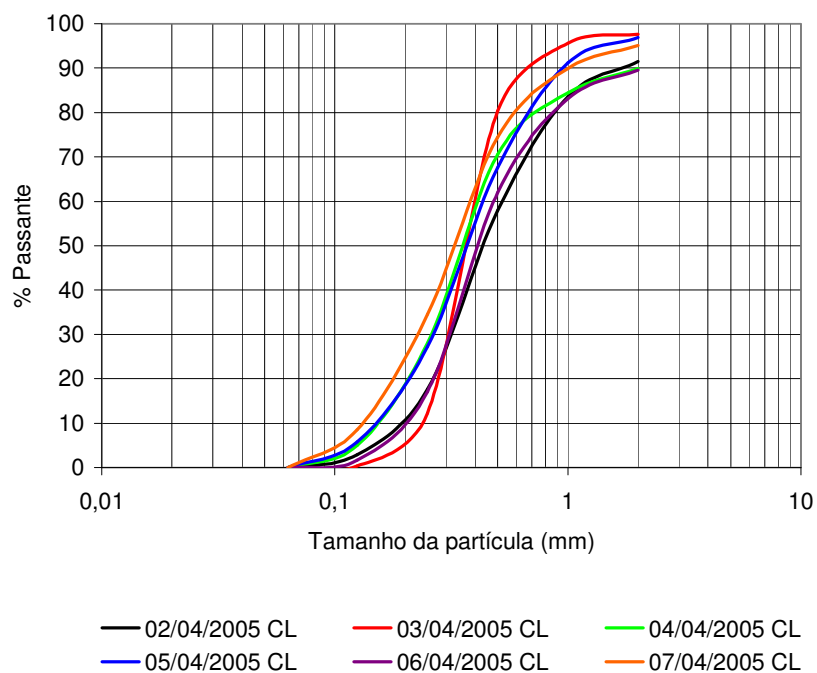
A tabela 5.4 apresenta a média ponderada dos diâmetros médios ( $d_{50}$ ) dos sedimentos constituintes da carga livre e fixa deste estudo e do estudo realizado por Vaze e Chiew (2002). O diâmetro médio encontrado neste trabalho referente à carga livre apresentou-se menor do que aquele encontrado no estudo dos referidos autores. As partículas referentes à carga fixa apresentam-se com um diâmetro médio semelhante ao estudo referenciado anteriormente. Uma explicação viável é que os sedimentos da carga fixa encontram-se agregados à superfície asfáltica e tendem a ser mais uniformes em diferentes locais, por outro lado, a carga livre parece ser mais suscetível à redistribuição e às influências do local em questão (presença de obras, tráfego, vento, etc).

**Tabela 5.4 - Diâmetro médio ( $d_{50}$ ) dos sedimentos referentes à carga livre e fixa.**

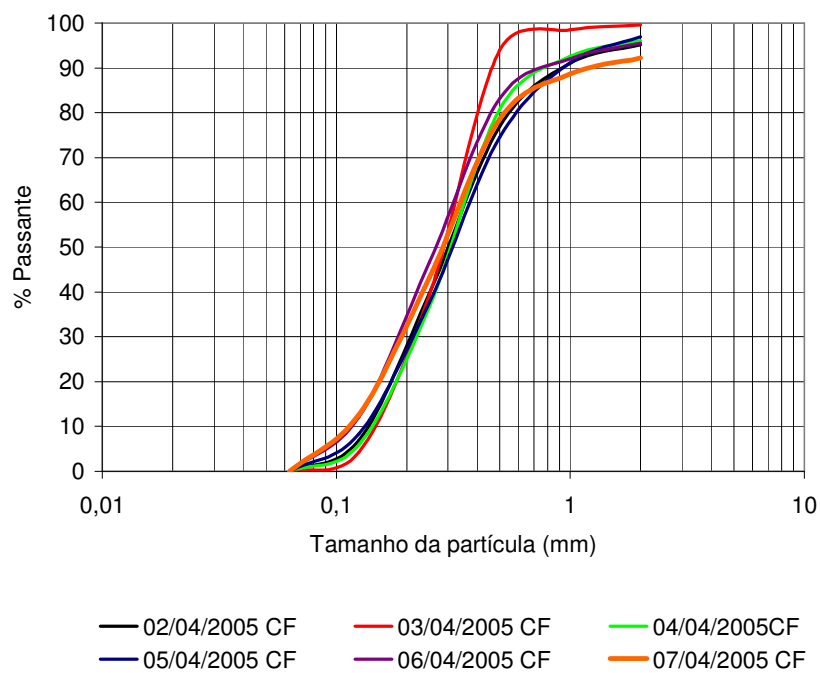
Local de Amostragem	Livre	Fixa
	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	
Rua Marques do Herval	$\approx 400$	$\approx 300$
Rua Rigoberto Duarte	$\approx 370$	$\approx 300$
Bouverie Street, Melbourne, Austrália*	$\approx 600$	$\approx 300$

\* Fonte: Vaze e Chiew, 2002

As figuras 5.21 a 5.29 apresentam a distribuição granulométrica das partículas ao longo do processo de acumulação durante os períodos secos. As curvas indicam que os sedimentos ficam mais finos à medida que a acumulação ocorre, uma vez que os sedimentos são desagregados pela ação do vento e do tráfego de veículos. A carga livre fica mais fina ao longo dos dias secos comparada com a carga fixa, uma vez que as partículas da carga fixa que se encontram agregadas à superfície são mais finas e as partículas da carga livre são mais suscetíveis a serem desintegradas em partículas menores. Esse comportamento é semelhante ao encontrado por Vaze e Chiew (2002) apresentado na figura 3.5.

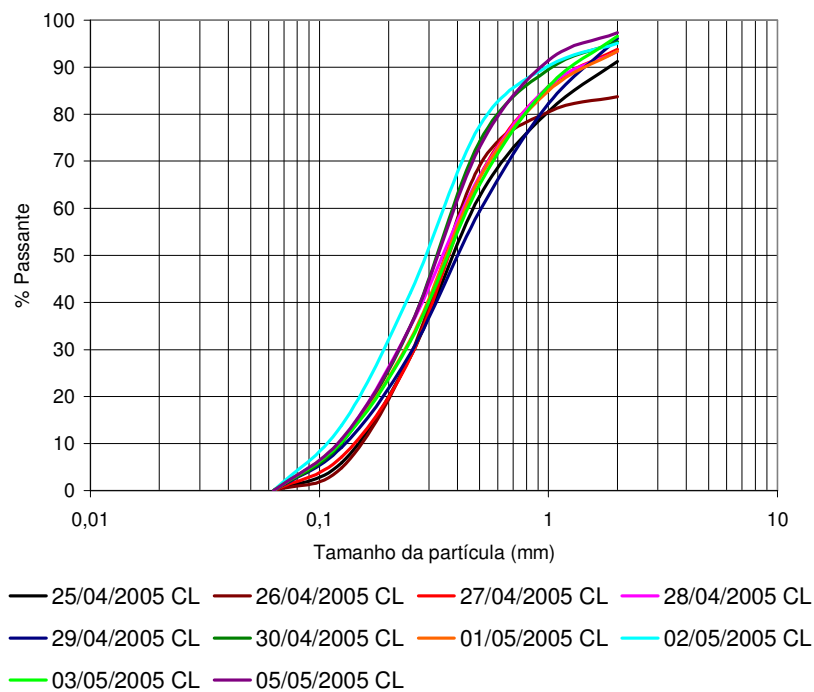


**Figura 5.22 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga livre da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 02/04 a 07/04.**

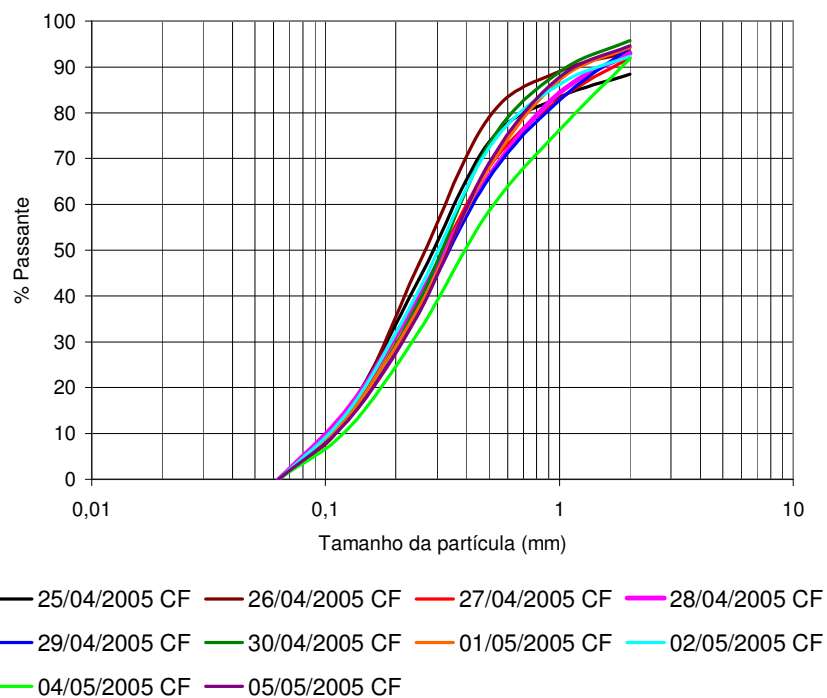


**Figura 5.23 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga fixa da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 02/04 a 07/04.**

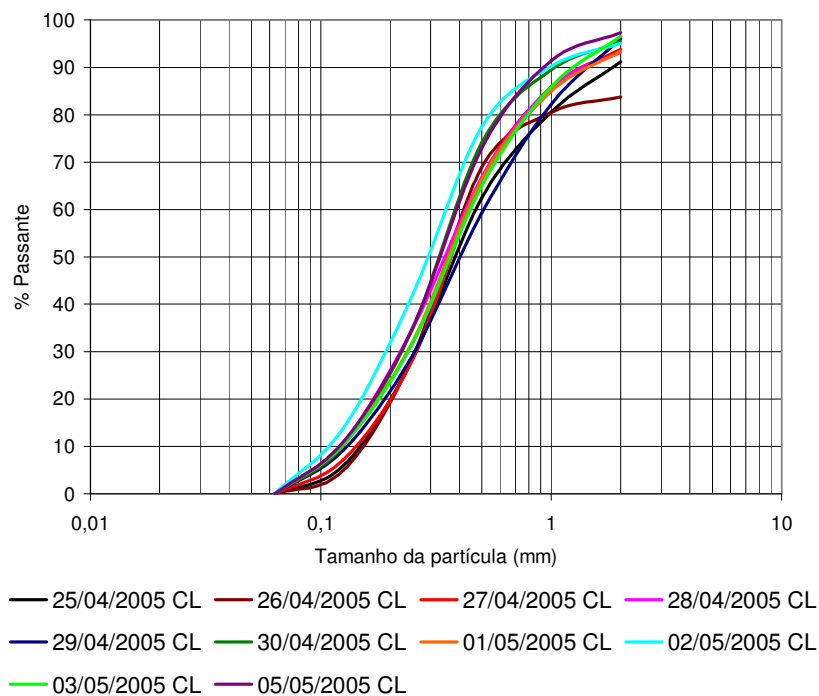




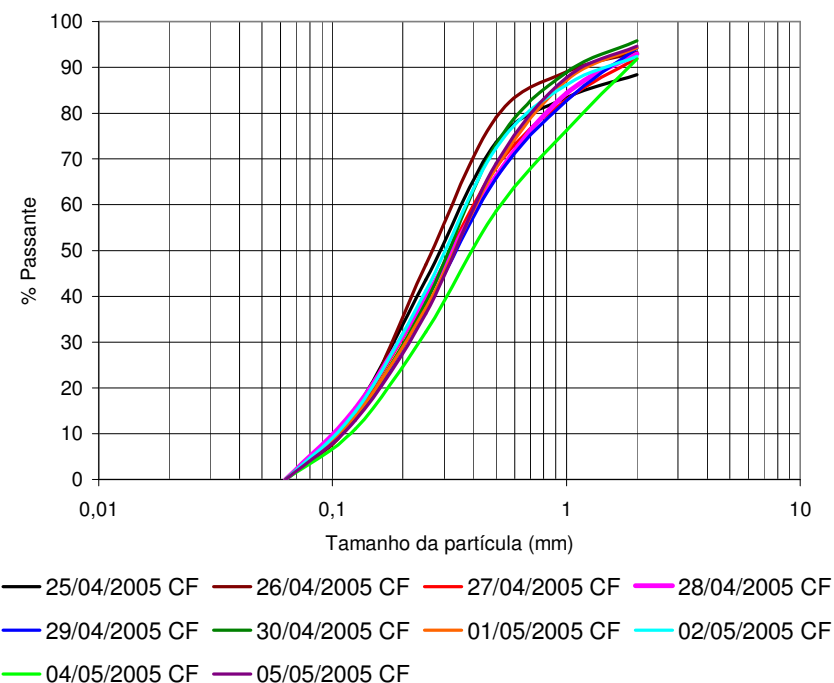
**Figura 5.24 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga livre da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 25/04 a 05/05.**



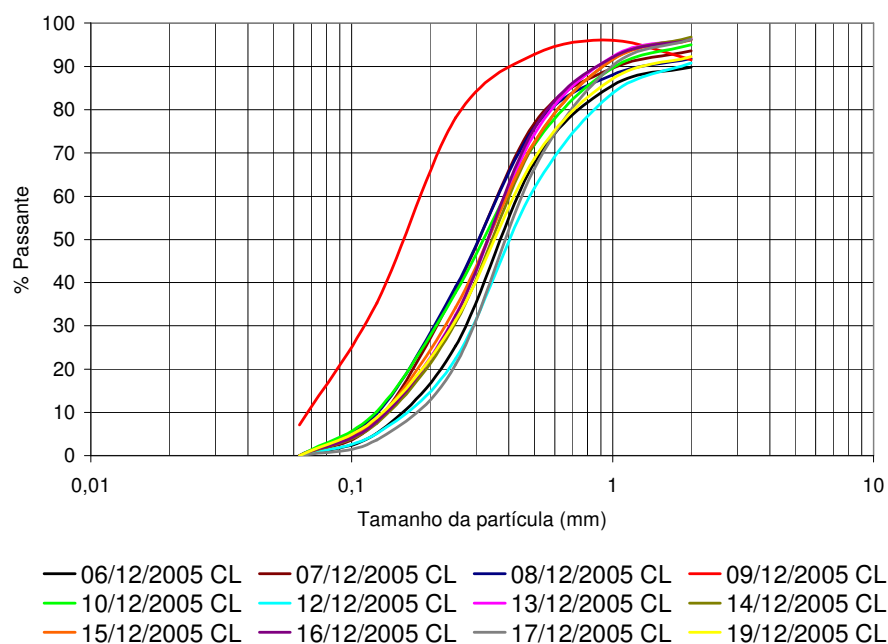
**Figura 5.25 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga fixa da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 25/04 a 05/05.**



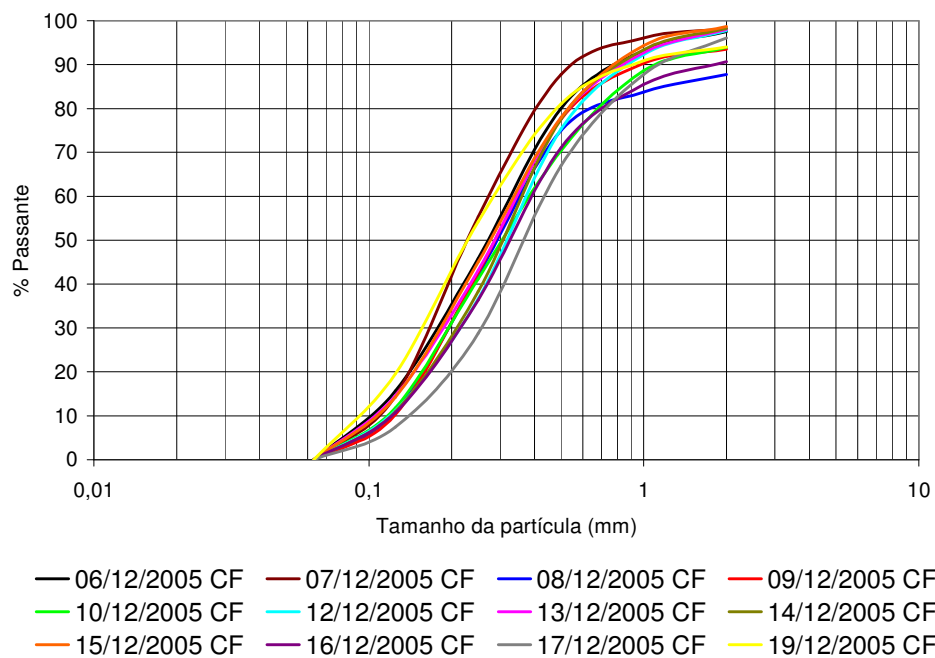
**Figura 5.26 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga livre da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 31/05 a 09/06.**



**Figura 5.27 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga fixa da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 31/05 a 09/06.**



**Figura 5.28 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga livre da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 06/12 a 19/12.**



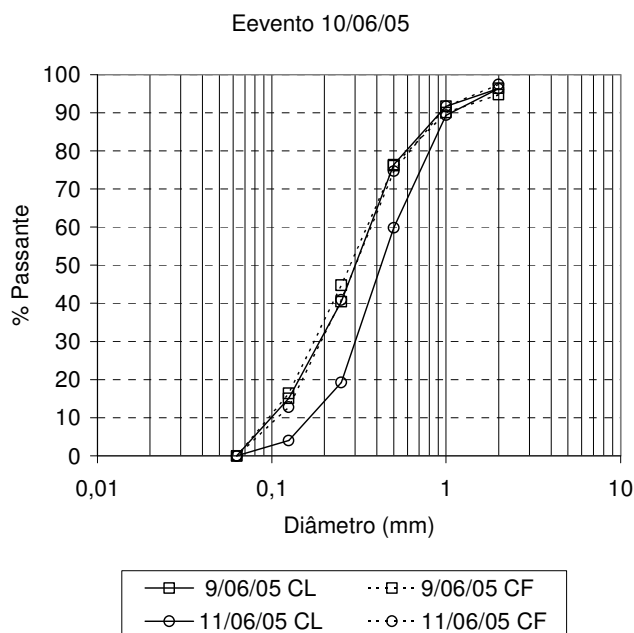
**Figura 5.29 - Mudança na distribuição granulométrica dos sedimentos constituintes da carga fixa da rua Marquês do Herval ao longo de um período seco de 06/12 a 19/12.**

#### 5.1.4. Efeito da precipitação na Distribuição Granulométrica dos Sedimentos

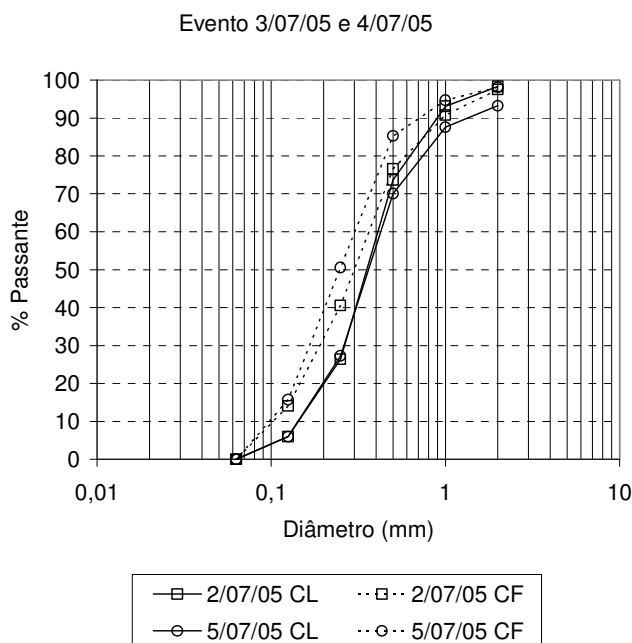
O efeito dos eventos de precipitação na distribuição granulométrica dos sedimentos é apresentado nas Figuras 5.30 a 5.32. Os sedimentos constituintes da carga livre apresentaram-se em geral mais grosseiros após os eventos de precipitação. Enquanto que os constituintes da carga fixa apresentaram-se mais finos após a maioria dos eventos.

Em resumo, os eventos de precipitação geralmente reduzem a quantidade de sedimentos da carga livre e alteram a distribuição granulométrica das partículas. Os eventos também aumentam a quantidade total e a proporção de material fino na carga fixa devido ao fato de que a chuva dissolve as partículas mais finas da carga livre, das quais algumas são carregadas pelo escoamento e outras permanecem agregadas à superfície em forma de carga fixa, resultando em um aumento de material fino na carga fixa.

**Figura 5.30 - Distribuição granulométrica dos sedimentos antes e depois do evento de precipitação do dia 08/08/05 - Rua Marquês do Herval.**



**Figura 5.31 - Distribuição granulométrica dos sedimentos antes e depois do evento de precipitação do dia 10/06/05 - Rua Marquês do Herval.**



**Figura 5.32 - Distribuição granulométrica dos sedimentos antes e depois do evento de precipitação dos dias 03/07/05 e 04/07/05 - Rua Marquês do Herval.**

### 5.1.5. Aplicação da equação proposta por Sartor and Boyd (1972 e 1974) *apud* Deletic et al. (1997)

#### 5.1.5.1. Calibração dos parâmetros

O período escolhido para a calibração dos parâmetros do modelo foi de aproximadamente um mês, englobando dois períodos maiores de tempo seco, 4 e 10 dias, e dois períodos menores intercalados. Foi encontrado um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,5128 e 0,5270 para as Ruas Marquês do Herval e Rigoberto Duarte respectivamente.

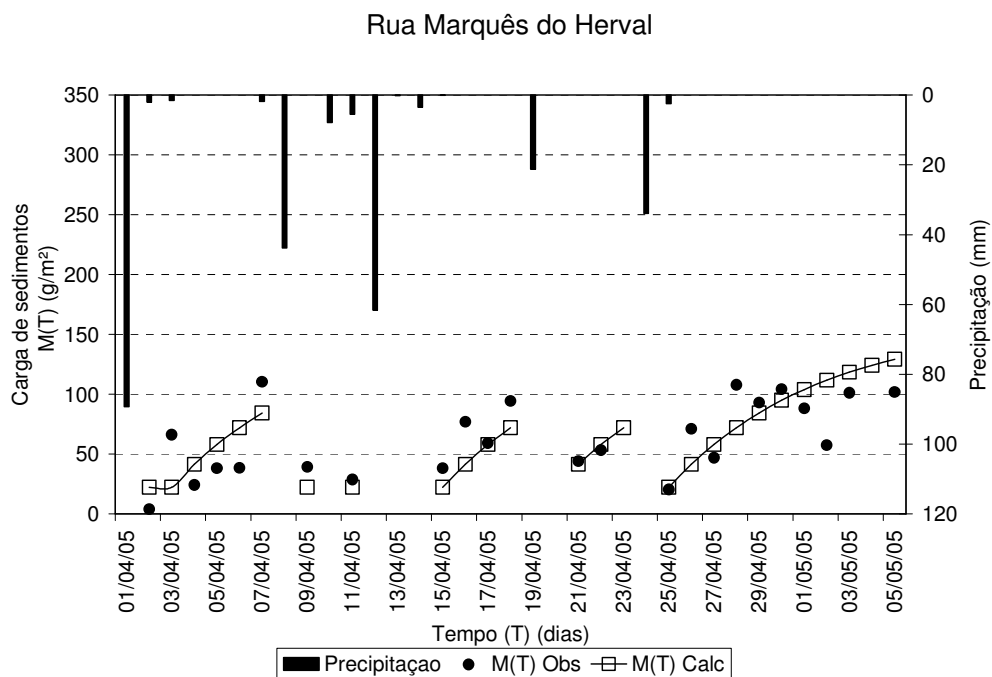
O valor de  $t'$  ( $t$  virtual) foi adotado igual a um dia, uma vez que durante a calibração, a análise dos dados observados mostrou o valor de aproximadamente 1,0 dia.

A seguir são apresentados os gráficos confeccionados com a calibração dos parâmetros e as equações resultantes para cada uma das ruas estudadas.

A calibração dos parâmetros  $M_0$  e  $k$  a partir dos dados observados na rua Marquês do Herval resultaram na seguinte equação.

$$M(T) = 160 (1 - e^{-0,15(t+1)}) \quad (5.1)$$

A figura 5.33 apresenta o gráfico confeccionado com a calibração.

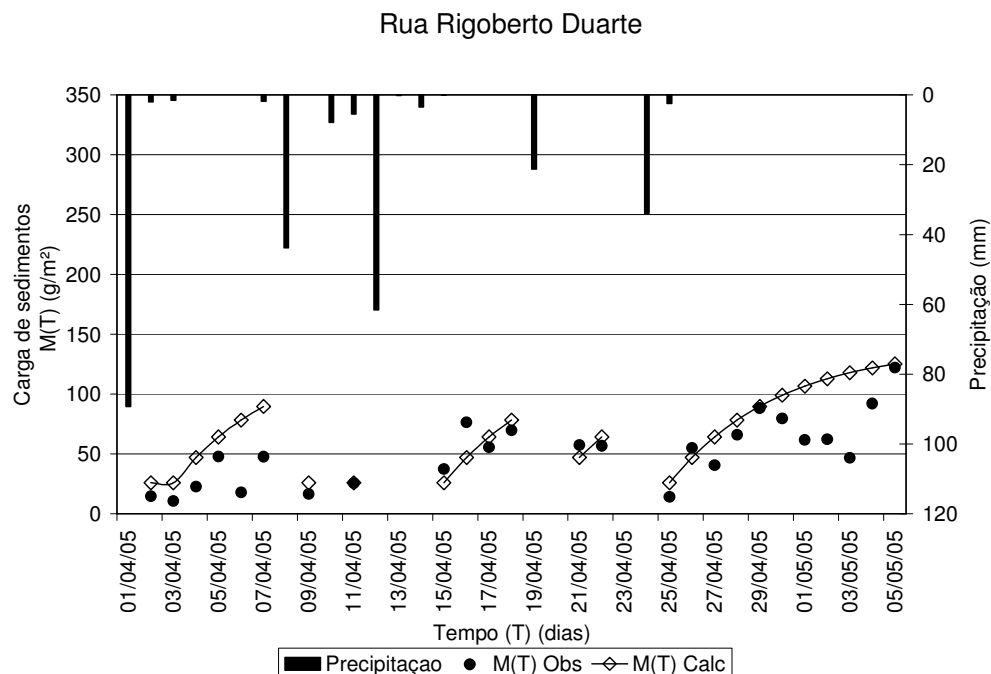


**Figura 5.33 - Calibração dos parâmetros  $M_0$  e  $k$  a partir dos dados observados na rua Marquês do Herval.**

A calibração dos parâmetros  $M_0$  e  $k$  a partir dos dados observados na Rua Rigoberto Duarte resultaram na seguinte equação.

$$M(T) = 140 (1 - e^{-0,20(t+1)}) \quad (5.2)$$

A figura 5.34 apresenta o gráfico confeccionado com a calibração.



**Figura 5.34 - Calibração dos parâmetros  $M_0$  e  $k$  a partir dos dados observados na rua Rigoberto Duarte.**

Conforme ilustrado nos gráficos acima, o modelo aplicado considera que a carga diminui após os eventos de precipitação, porém não zera devido ao efeito do  $t'$ . O evento de precipitação ocorrido no dia 01/04/05 (89,23 mm) foi o maior registrado no período de coleta dos sedimentos secos. É visível que a precipitação elevada neste dia acarretou em uma grande redução da carga presente na superfície. Em torno de 98% conforme discutido no item 5.1.1. Dessa forma, é de muita importância que seja desenvolvido um modelo de acumulação que considere a influência do volume de precipitação ocorrido nos dias antecedentes ao período seco.

#### 5.1.5.2. Verificação do modelo

As figuras 5.35 a 5.42 apresentam a verificação da aplicabilidade do modelo em períodos secos distintos para as duas ruas monitoradas.

As figuras 5.35 e 5.36 apresentam a aplicação do modelo para o período de 19/06/05 25/06/05.

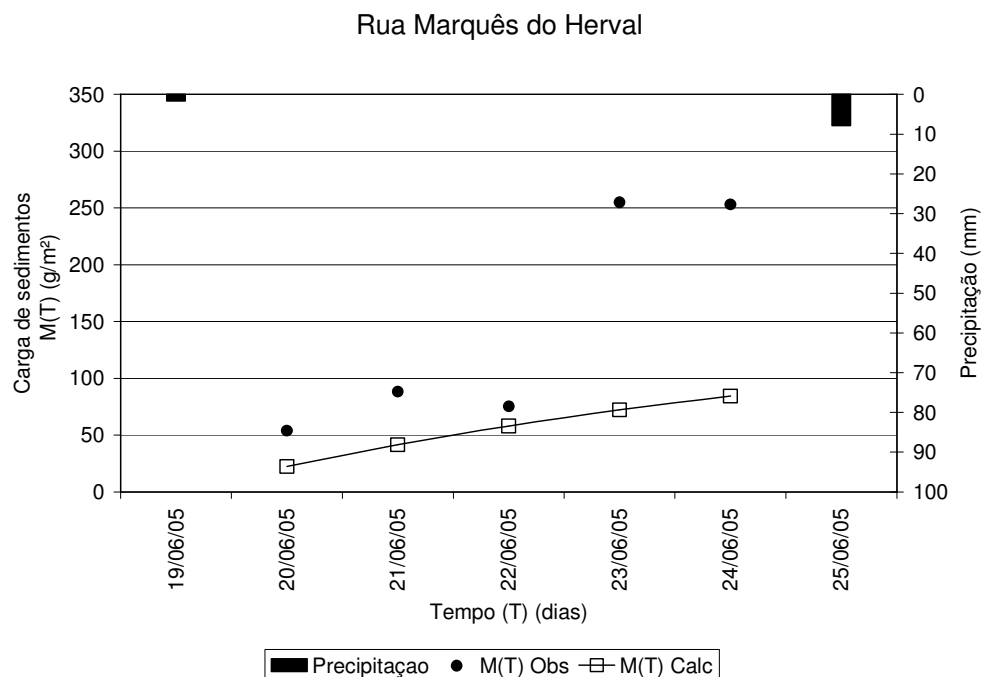


Figura 5.35 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Marquês do Herval.

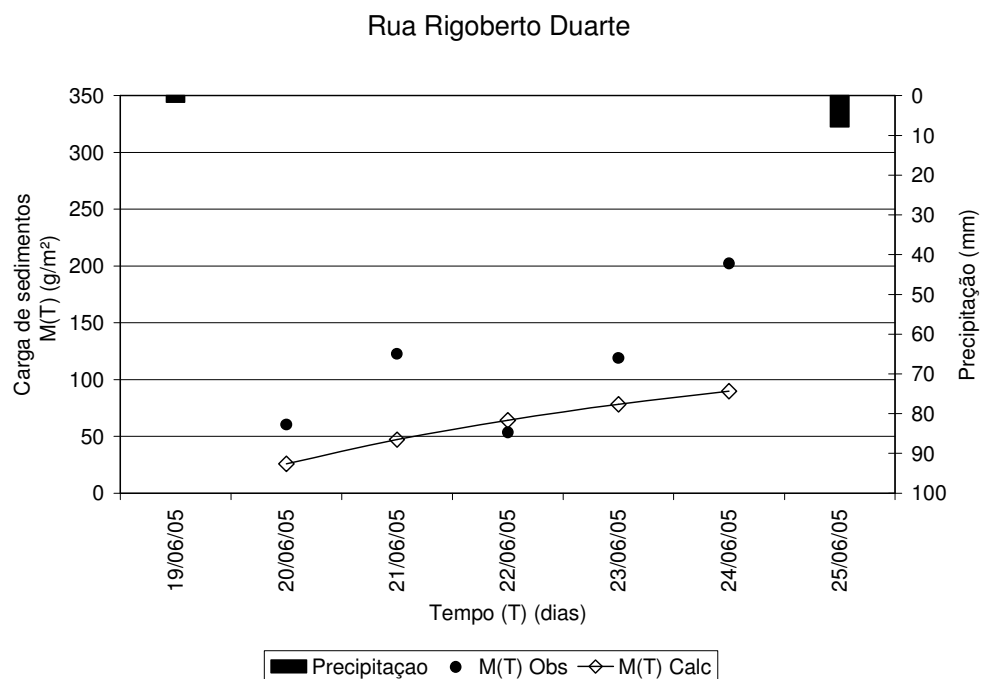


Figura 5.36 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Rigoberto Duarte.



As figuras 5.37 e 5.38 apresentam a aplicação do modelo para o período de 26/06/05 03/07/05.

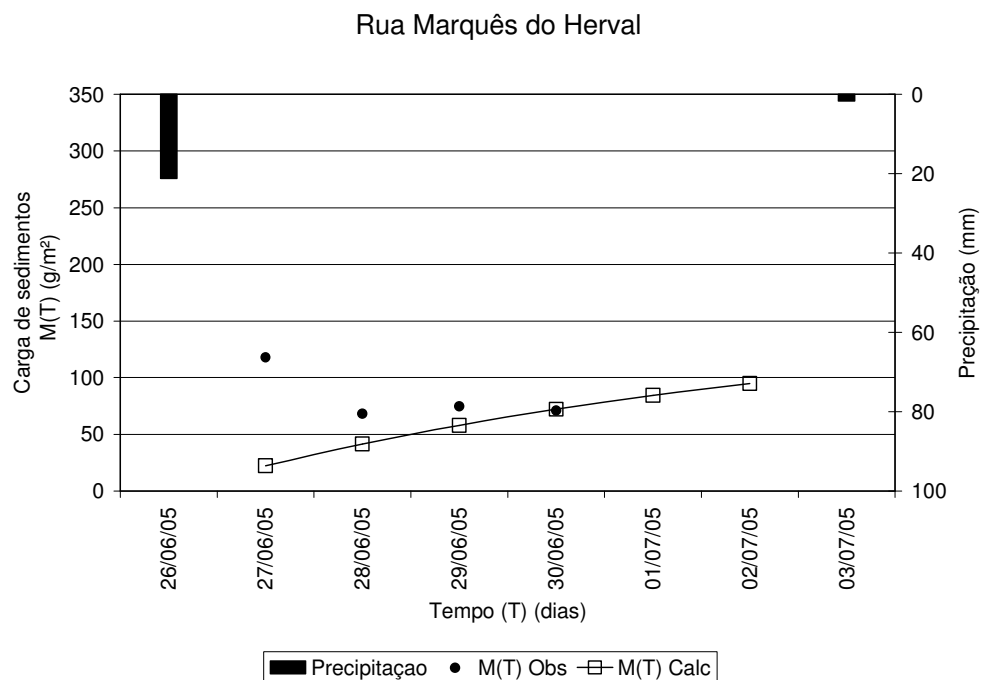


Figura 5.37 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Marquês do Herval.

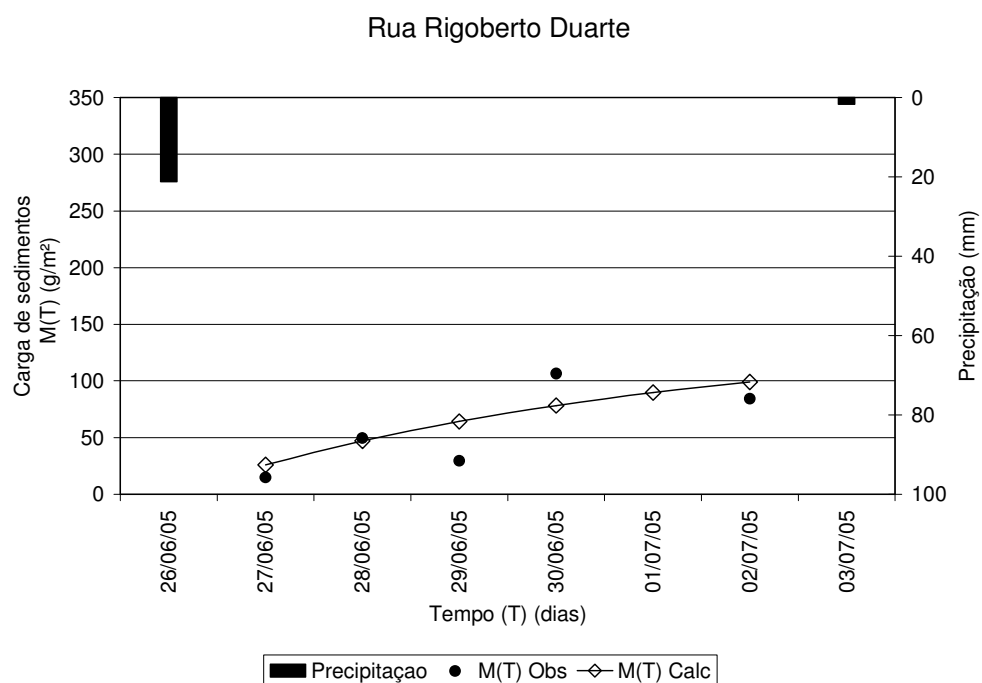
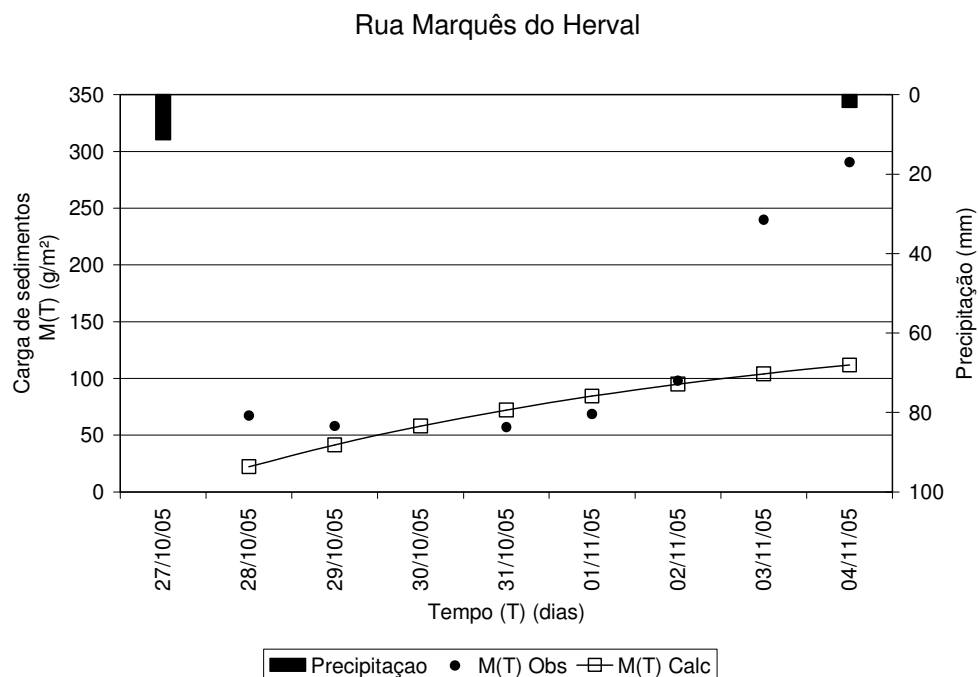
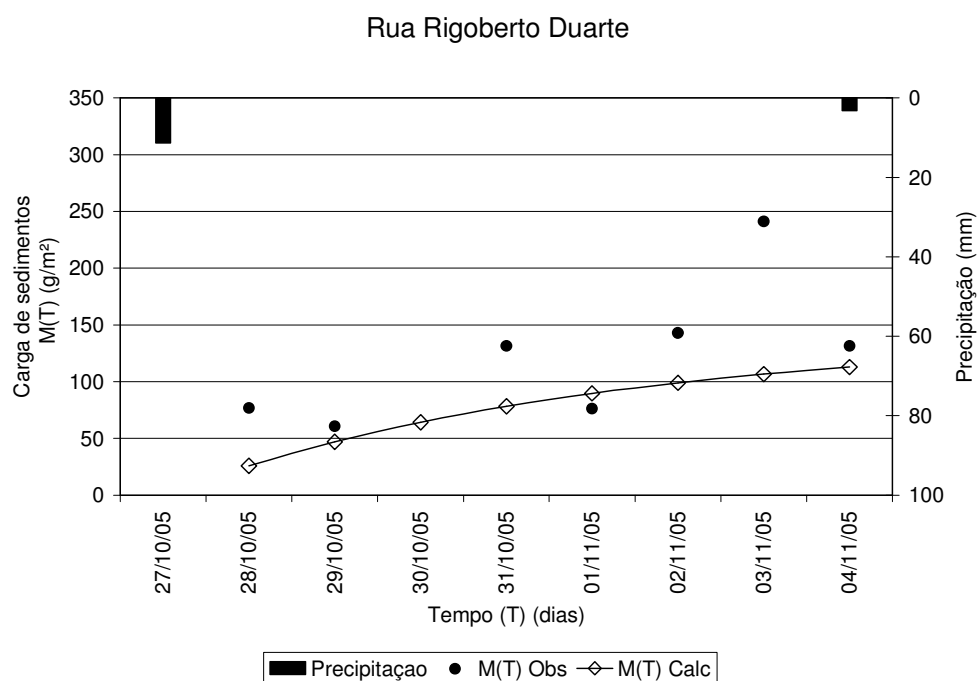


Figura 5.38 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Rigoberto Duarte.

As figuras 5.39 e 5.40 apresentam a aplicação do modelo para o período de 27/10/05 04/11/05.



**Figura 5.39 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Marquês do Herval.**



**Figura 5.40 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Rigoberto Duarte.**

As figuras 5.41 e 5.42 apresentam a aplicação do modelo em um período onde a redução da carga devido ao efeito da ocorrência de um evento de precipitação pode ser ilustrado.

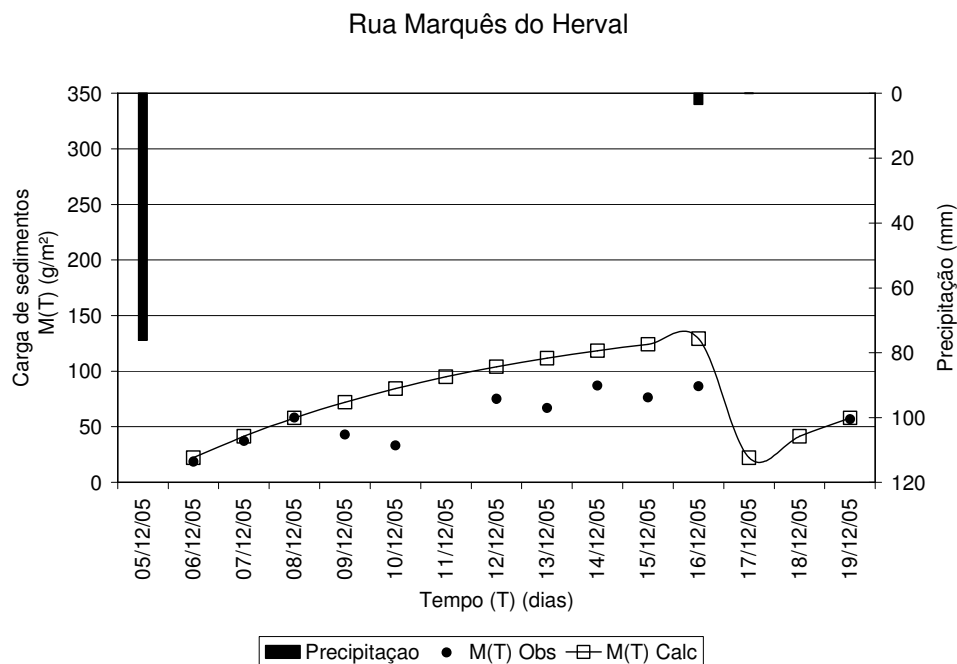


Figura 5.41 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Marquês do Herval.

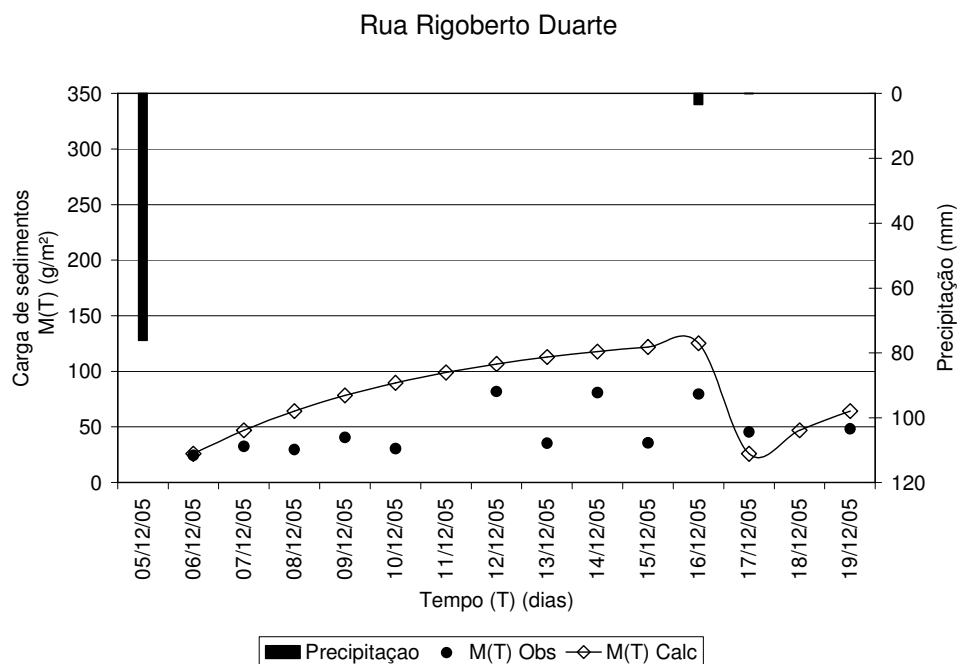


Figura 5.42 - Verificação da aplicabilidade do modelo - Rua Rigoberto Duarte.

A tabela 5.5 apresenta os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre as cargas observadas e calculadas nos períodos secos mais relevantes no período de monitoramento. Observa-se que os valores encontrados para a rua Rigoberto Duarte foram menos satisfatórios do que os encontrados para a rua Marquês do Herval. Isso ocorreu principalmente devido ao maior grau de atividades antrópicas e declividade nesta rua.

**Tabela 5.5 - Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre as cargas observadas e calculadas nos períodos secos mais relevantes no período de monitoramento.**

Período		$R^2$	
		R. Marquês do Herval	R. Rigoberto Duarte
19/06/05	- 25/06/05	0,76	0,48
26/06/05	- 02/07/05	0,60	0,63
27/10/05	- 04/11/05	0,51	0,44
05/12/05	- 19/12/05	0,75	0,30

Os parâmetros encontrados neste estudo apresentam valores maiores do que aqueles encontrados por Butler & Clark (1995) e Deletic et al. (1997 e 2000) mencionados no capítulo 3.

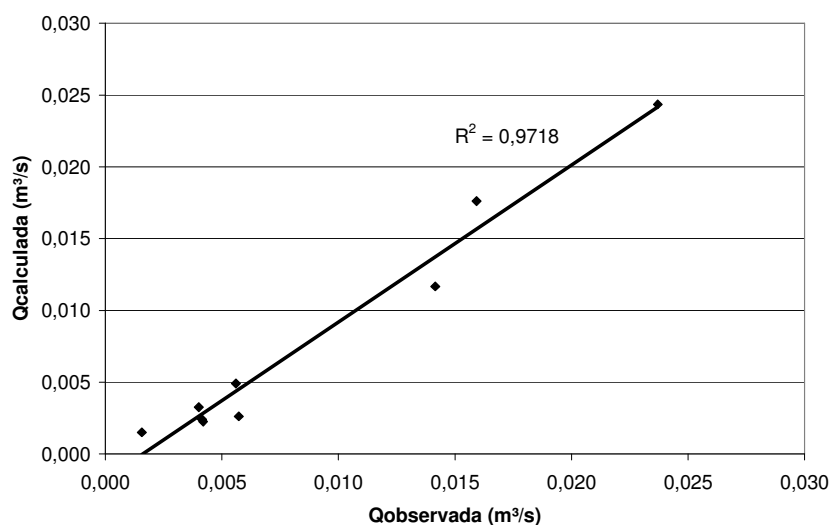
As ruas estudadas pelos referidos autores apresentam limpeza periódica e mecanizada enquanto que, as ruas aqui estudadas não apresentam nenhuma prática de limpeza periódica, implicando em valores maiores para a carga máxima e para a constante de deposição nas ruas aqui monitoradas.

Como mencionado na descrição da área de estudo, a rua Rigoberto Duarte apresenta uma maior intensidade de tráfego do que a rua Marquês do Herval. A calibração dos parâmetros resultou, conforme o esperado, em um maior valor de  $k$ , o coeficiente de acumulação, para a rua com tráfego mais intenso.

## 5.2. Monitoramento fluviográfico

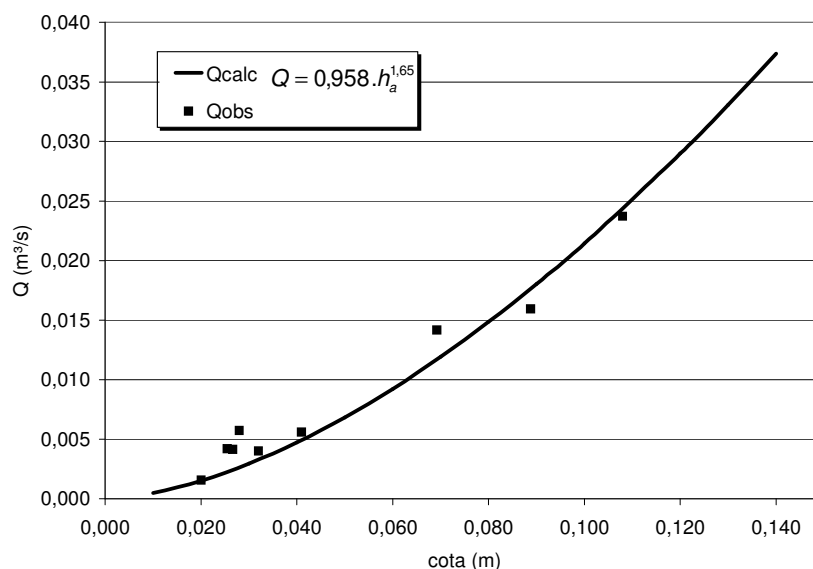
Conforme mencionado no capítulo 4, foram realizadas medições de vazões através de um sensor de velocidade baseado no princípio magnético indutivo a fim de verificar o pleno funcionamento dos registros do Thalimedes (OTT) e do dimensionamento e execução da calha.

A figura 5.43 apresenta a correlação entre os valores de vazão em  $\text{m}^3/\text{s}$  encontrados através das medições de campo e os valores calculados com a equação da calha calibrada.



**Figura 5.43 - Correlação entre as vazões medidas em campo e as vazões calculadas pela equação da calha calibrada.**

A figura 5.44 apresenta a curva chave obtida através de equação da calha e verificada com os valores medidos em campo.



**Figura 5.44 - Curva chave obtida através de equação da calha e verificada com os valores medidos em campo.**

A curva chave apresentou um bom ajuste até a cota de 0,11 m. A dificuldade em ajustar os valores para cotas acima desta mencionada encontra-se na falta de eventos que ultrapassassem essa cota durante o dia; horário possível de medição. Porém, os valores observados indicam a precisão no dimensionamento e construção da calha, bem como o pleno funcionamento dos registros do Thalimedes (OTT).

Mesmo obtendo-se cotas bastante baixas durante as medições, considera-se que o dimensionamento da calha foi adequado, uma vez, que ocorreram eventos noturnos com cotas em torno de 0,40 m.

Durante o período dos trabalhos de campo, verificou-se a dificuldade de monitoramento durante os eventos de precipitação.

### 5.3. Monitoramento sedimentométrico

Foram realizadas campanhas de medição da descarga sólida diretamente na saída da canalização do sistema de drenagem conforme descrito no capítulo 4.

Muitas dificuldades são enfrentadas durante os trabalhos de campo. A primeira, durante as campanhas iniciais, foi reunir a equipe para chegar até a estação antes ou no início da chuva a fim de coletar a carga inicial. Muitos eventos serviram apenas para a medição de vazão, uma vez que a equipe chegava ao local

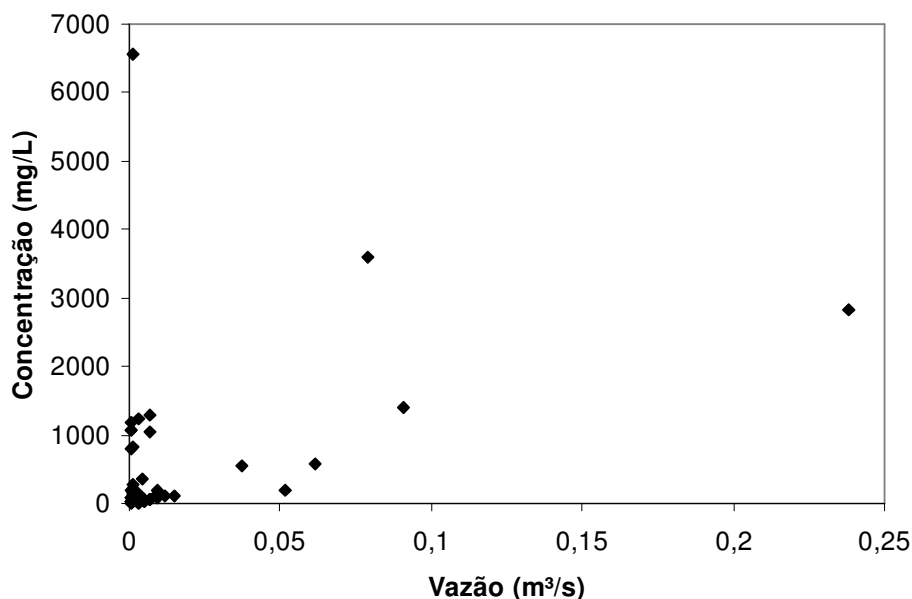
já no meio do evento. No decorrer do tempo chegar ao local da estação no início do evento continuou sendo a principal dificuldade. O amostrador automático não possui sensor de nível, então ele é programável somente em função de intervalos de tempo, contribuindo com a dificuldade principal. Os eventos, que atingiram as maiores cotas foram outro fator limitante, pois a maioria deles ocorreu durante a noite, confirmando o comportamento das precipitações em Santa Maria analisado por Paiva (1997), trabalho no qual o autor apresentou que maior parte dos eventos (69%) ocorrem entre 0:00 e 6:00 horas.

### **5.3.1. Concentração de sedimentos em suspensão**

As análises das amostras líquidas, provenientes da microdrenagem, mostraram que a concentração de sedimentos variou de 8,0 a 6.000 mg/L. Apresentando um valor médio de 537,05 mg/L nos eventos chuvosos.

A figura 5.45 apresenta o gráfico que relaciona a concentração de sedimentos (mg/L) com a vazão ( $m^3/s$ ), na qual é possível observar que não existe correlação entre a vazão e a concentração de sedimentos, uma vez que a carga inicial depende de fatores, como: as condições de precipitação antecedente, intensidade da precipitação e da carga disponível para transporte, que apresentam grande variabilidade durante os eventos.

O ajuste inadequado também enfatizou a grande variabilidade da concentração de sedimentos ao longo de um evento de precipitação, a influência da carga de lavagem e a complexidade da propagação dos sedimentos na rede de drenagem.



**Figura 5.45 - Relação entre a concentração de sedimentos e a vazão.**

As figuras 5.46 a 5.48 apresentam gráficos, que relacionam a vazão e a concentração de sedimentos no tempo durante eventos de chuva. Pode-se constatar um comportamento inicial semelhante. A concentração de sedimentos no início da cheia, mesmo com a vazão bem reduzida, é mais elevada, apresentando um pico, que possivelmente representa a presença do fenômeno da carga de lavagem das ruas. Após este pico, há uma redução no valor da concentração de sedimentos que mantém certa proporcionalidade com a variação da vazão, pois é observado que em geral, o aumento da concentração ao longo do evento, ocorre juntamente com os picos da vazão.

Por outro lado, o aumento da concentração, no momento em que há uma diminuição da vazão no evento do dia 15/06 deve-se provavelmente à existência de sedimento já inserido no processo de transporte pelo escoamento superficial, concordando com a constatação feita por Deletic (1998) descrita no final do item 3.2.1.



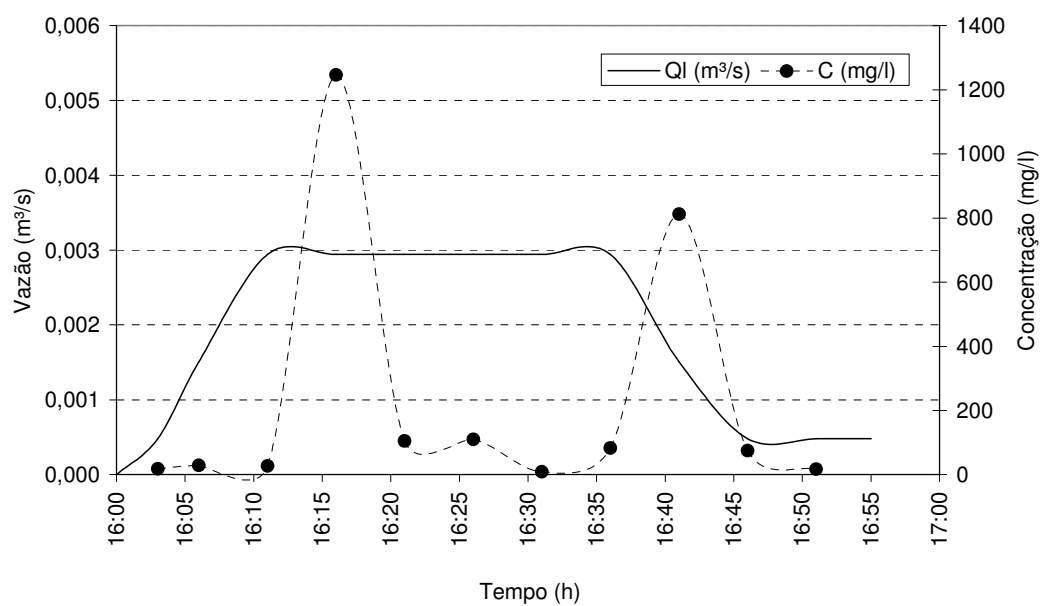


Figura 5.46 - Gráfico da concentração de sedimentos e vazão no evento do dia 15/06/05.

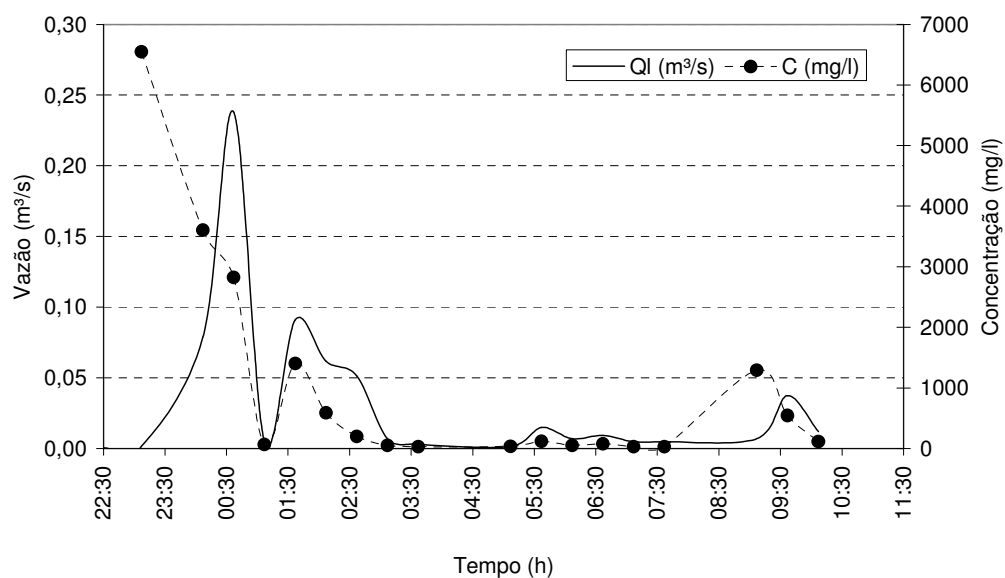


Figura 5.47 - Gráfico da concentração de sedimentos e vazão no evento dos dias 03/10/05 e 04/10/05.

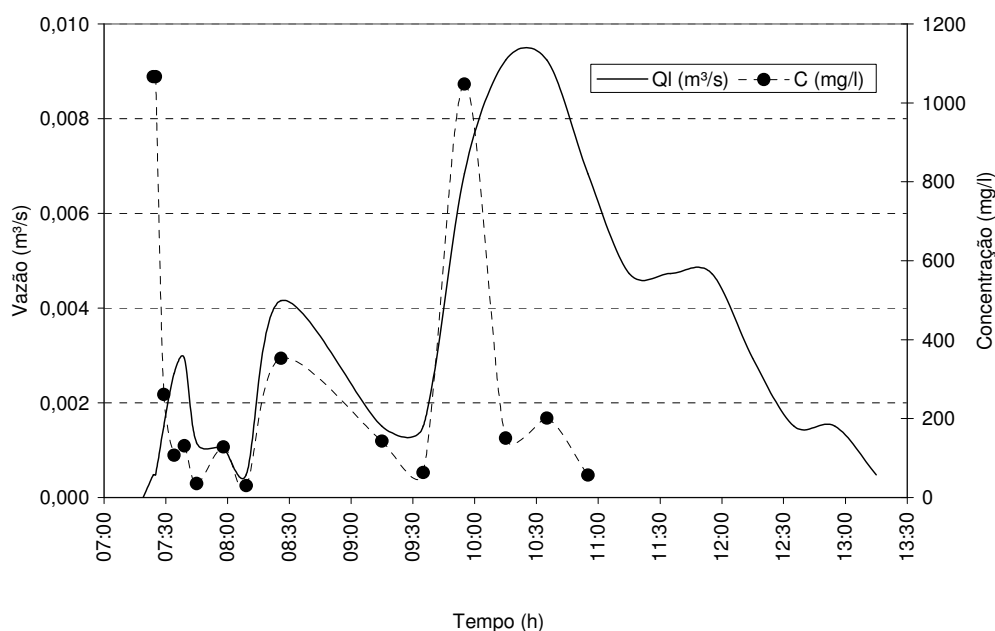


Figura 5.48 - Gráfico da concentração de sedimentos e vazão no evento do dia 23/12/05.

### 5.3.2. Descarga sólida em suspensão

A figura 5.49 apresenta a relação entre a descarga líquida ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e a descarga sólida ( $\text{g/s}$ ).

As descargas sólidas foram calculadas a partir dos dados de concentração e vazão medidos durante os eventos chuvosos. O sedimento retido na calha no final dos eventos não foi considerado na confecção da curva.

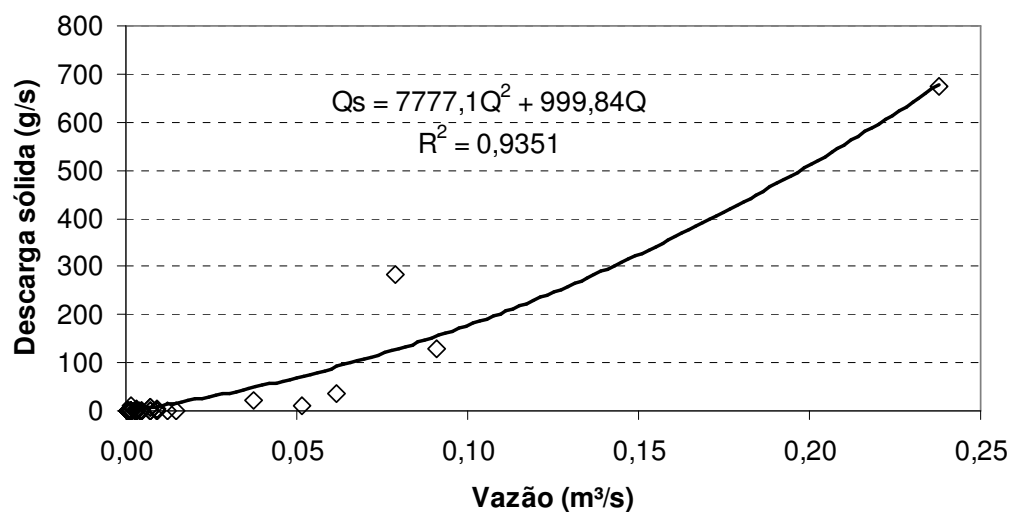
A equação obtida foi a seguinte:

$$Q_s = 7777,1 Q^2 + 999,84 Q \quad (5.3)$$

Onde:

$Q$  = vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_s$  = descarga sólida ( $\text{g/s}$ )



**Figura 5.49 - Relação entre a descarga líquida e a descarga sólida.**

O ajuste apresenta-se aparentemente muito bom, porém há uma grande variação nos dados referentes às menores descargas. Desta forma, o ajuste é mais satisfatório para os eventos maiores, que são responsáveis pela maior parte da carga total transportada até o arroio.

As figuras 5.50 a 5.52 apresentam o hidrograma dos eventos analisados e as descargas sólidas apenas dos pontos onde existiam valores de concentração observados.

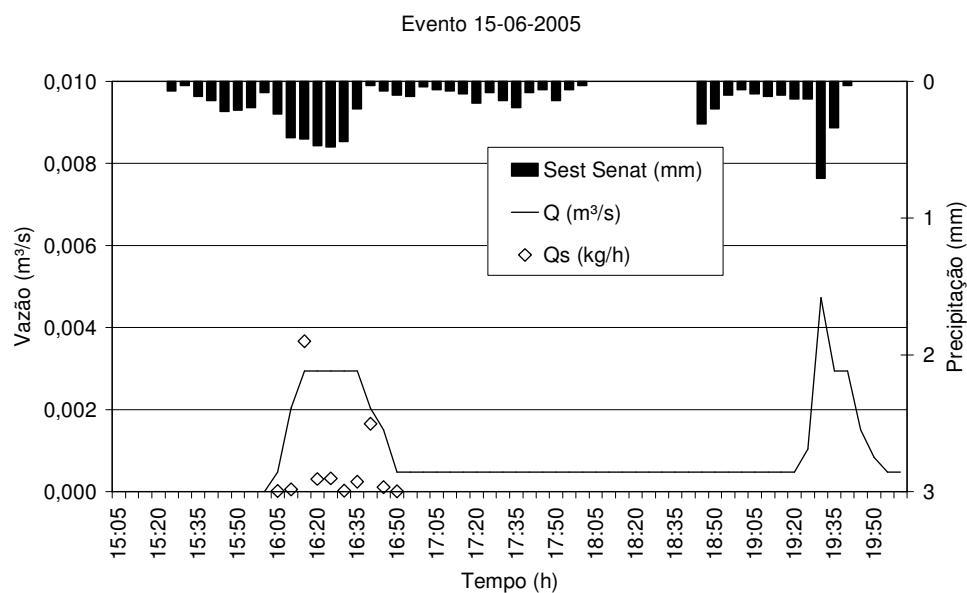


Figura 5.50 - Hidrograma do Evento 15/06/05.

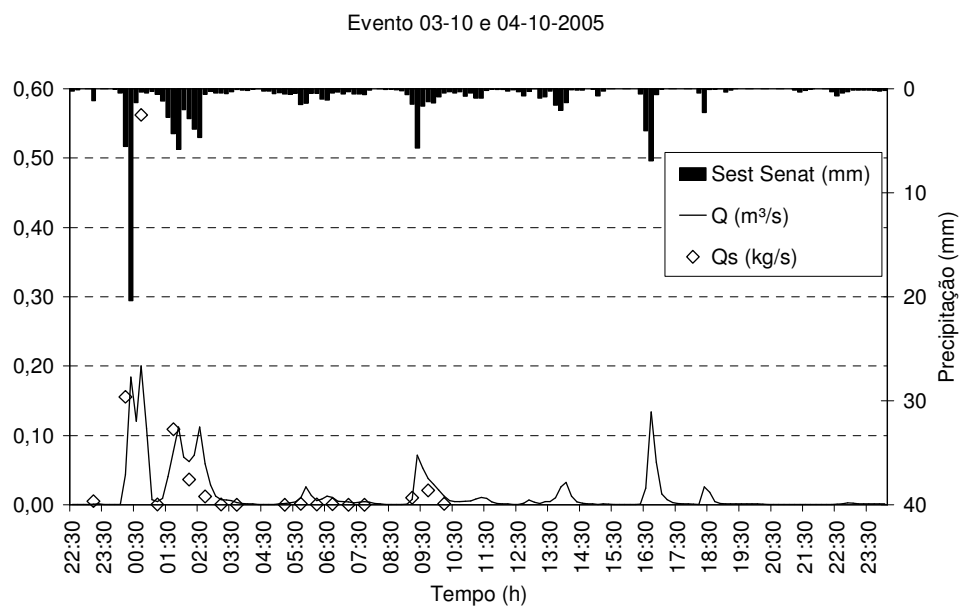
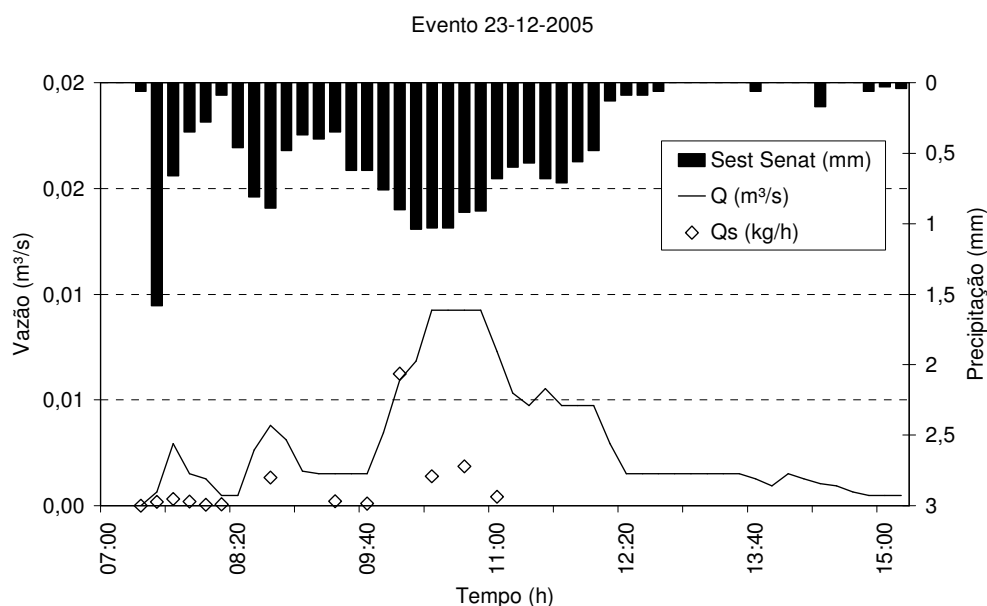


Figura 5.51 - Hidrograma do Evento 03/10/05 e 04/10/05.



**Figura 5.52 - Hidrograma do Evento 23/12/05.**

A tabela 5.6 apresenta, para cada evento, a precipitação total ( $P$ ) durante o intervalo de tempo de coleta de amostras líquidas, a duração da precipitação, o volume escoado, a massa ( $M_1$ ) obtida através dos valores das descargas sólidas, a massa ( $M_2$ ) resultante da acumulação de sedimentos no fundo da calha após os eventos, a massa total ( $M = M_1 + M_2$ ), a descarga sólida e a carga de sedimentos, que foi calculada pela relação entre a massa total e a área de contribuição. A tabela apresenta também a estimativa da carga antecedente ao evento presente na superfície da rua, calculada a partir da equação 5.1.

**Tabela 5.6 - Carga sólida dos eventos de cheia medidos.**

Data	P (mm)	Duração (h)	Vol. Escoado	$M_1$ (g)	$M_2$ (g)	$M_T$ (g)
15/06/05	4,05	0,80	4,92	1785,72	1568,00	3353,72
3/10/2005 - 4/10/2005	86,65	11,00	1252,47	2387363,00	4,90	2387367,89
23/12/05	15,04	3,52	46,566	16737,48	2716,00	19453,48

**Tabela 5. 6 - Carga sólida dos eventos de cheia medidos.**

...continuação			
Data	Qs (g/s)	Carga - Evento (g/m <sup>2</sup> )	Carga-Rua (g/m <sup>2</sup> ) *
15/06/05	1,16	0,06	22,29
3/10/2005 - 4/10/2005	60,29	39,79	41,47
23/12/05	1,54	0,32	94,949

\* Calculada pela equação 5.1

No dia 15/06 pela manhã, antes do início da chuva, foi observada uma carga de sedimento seco de 38,39 g/m<sup>2</sup> na sarjeta da rua Marquês do Herval. No mesmo dia, decorrente do período do evento de precipitação monitorado, foi observada uma carga de 0,06 g/m<sup>2</sup> de sedimento. Deve-se considerar que esta carga é resultante apenas da primeira hora inicial da chuva.

A chuva do dia 03/10 teve início às 22:00 e durou até o final do dia 04/10. Não há dados observados da carga de sedimento seco nesses dias, então a carga total na rua no dia 03/10 foi estimada pela equação 5.1 e o valor obtido foi de 41,47 g/m<sup>2</sup>. As descargas sólidas neste dia indicaram uma carga de 39,79 g/m<sup>2</sup> e uma massa total de 2,38 ton.

A precipitação teve início às 7:30 na manhã do dia 23/12. A carga de sedimento seco na rua referente ao dia 22/12 foi estimada pela equação 5.1, obtendo-se o valor de 94,95 g/m<sup>2</sup>. As descargas sólidas neste dia indicaram uma carga de 0,32 g/m<sup>2</sup> e uma massa total de 19453,48 kg.

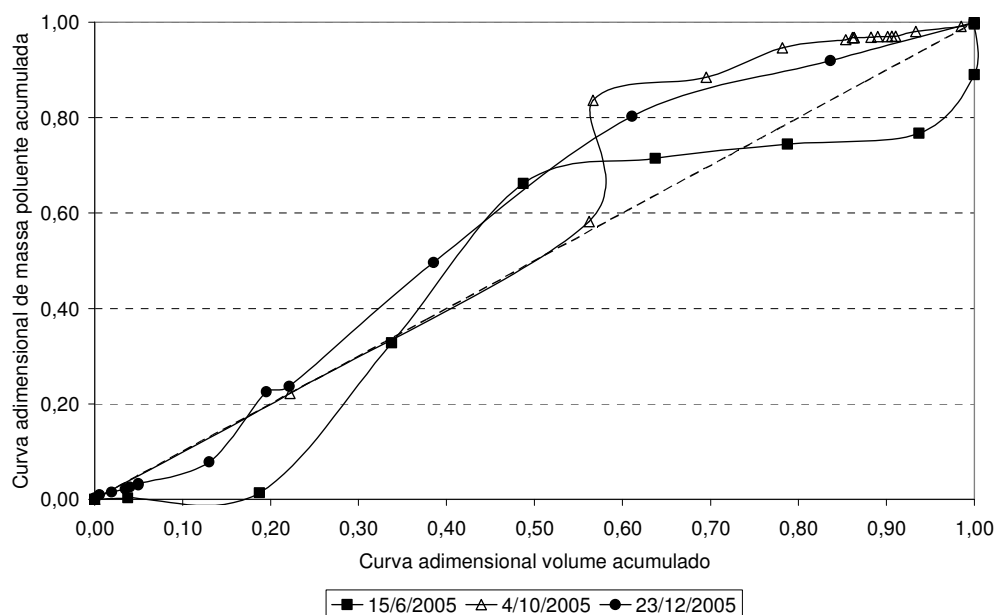
Pode-se verificar que apenas o evento de maior precipitação, ocorrido durante os dias 03/10 e 04/10, realmente transportou a carga de sedimentos presente na rua. O tempo de retorno para tal precipitação foi calculado através da equação de chuva de Santa Maria conforme Paiva (1997) e é igual a 2 anos. Desta forma, pode-se reafirmar que os eventos típicos de precipitação removem apenas uma parte dos sedimentos presentes na superfície.

A partir da equação 5.3, foi estimada a descarga sólida de sedimento para cada evento de precipitação, que gerou escoamento na calha do dia 01/06/05 ao dia 23/12/05. Com os valores das descargas sólidas, a massa total transportada na microdrenagem durante o período de monitoramento foi determinada. O valor encontrado de 3,05 ton/ha/ano sugere a ordem de grandeza da descarga de sedimentos que é transportada na microdrenagem e atinge o arroio Cancela.

### 5.3.3. Carga de lavagem

A ocorrência ou não da carga de lavagem foi verificada durante as cheias, uma vez que os eventos analisados apresentaram uma maior concentração de sedimentos no início dos eventos.

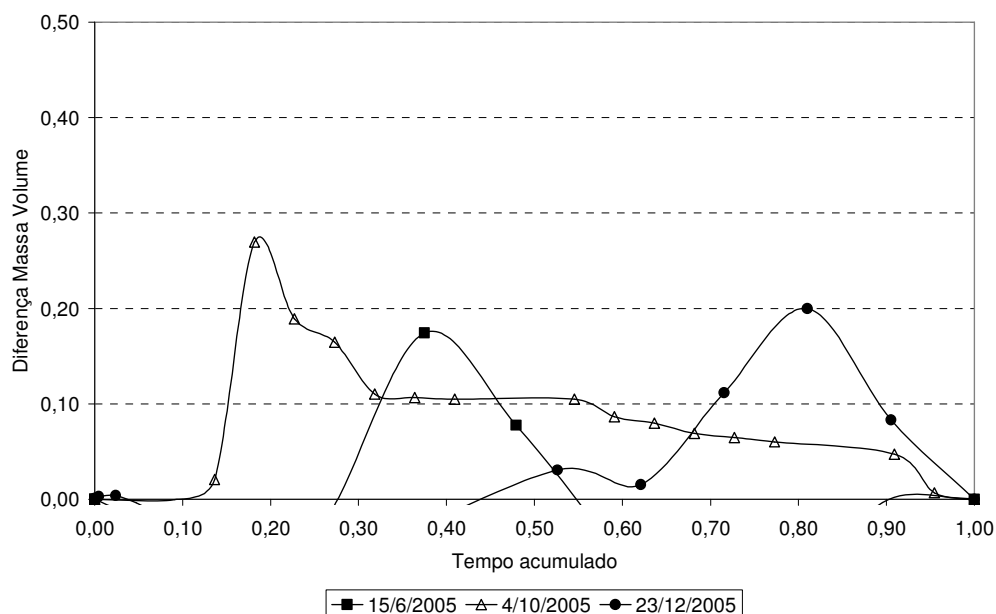
A figura 5.53 apresenta as curvas  $M(V)$  de sedimentos referentes aos eventos em discussão.



**Figura 5.53 - Curvas  $M(V)$  dos eventos analisados.**

As curvas  $M(V)$  apresentam-se acima do bissetor na maioria dos eventos, indicando que a carga poluente não foi distribuída uniformemente ao longo do volume escoado.

A figura 5.54 apresenta o resultado da diferença entre as curvas adimensionais de massa poluente acumulativa e do volume escoado acumulativo através do tempo acumulativo do evento. Os resultados quando maiores que 0,2 indicam a ocorrência da carga de lavagem.



**Figura 5.54 - Curvas Máxima Divergência dos eventos analisados.**

Os eventos ocorridos nos dias 03 e 04/10 e 23/12 apresentaram carga de lavagem conforme Gupta e Saul (1996), sendo que a ocorrência aumentou com a intensidade da precipitação.

#### **5.3.4. Análises granulométricas**

Foram determinadas as curvas granulométricas das amostras submetidas ao ensaio de peneiramento seco e tubo de remoção pelo fundo, as demais amostras não tiveram a granulometria dos finos determinada porque foram submetidas ao ensaio de evaporação. A título de exemplificação, a curva a seguir apresenta a distribuição granulométrica do material coletado às 00h07min do dia 03/10/05.



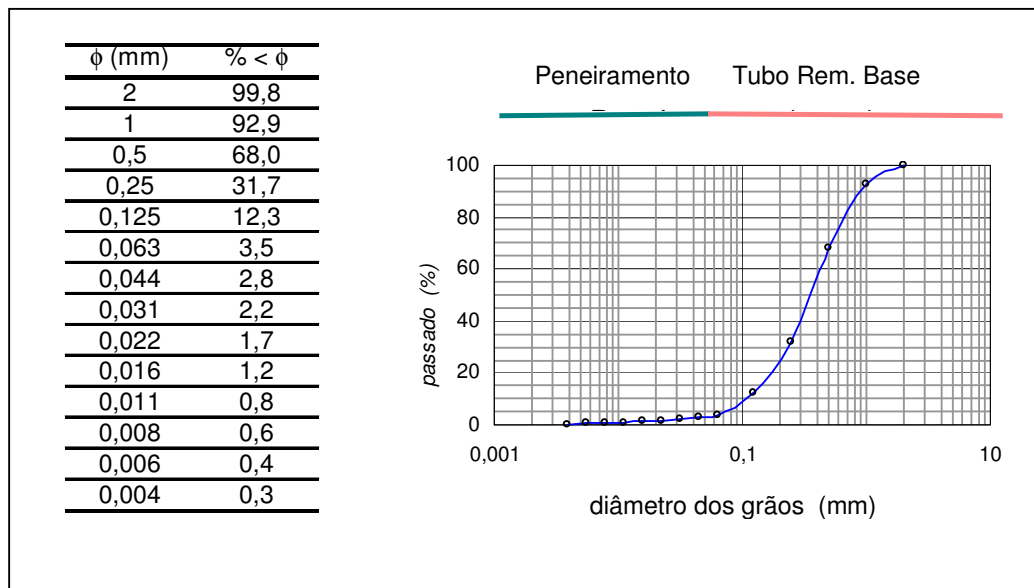


Figura 5.55 - Distribuição granulométrica do material coletado as 00:07 do dia 04/10/05.

Na figura 5.56 foram plotadas as curvas granulométricas das amostras coletadas no evento dos dias 03 e 04/10.

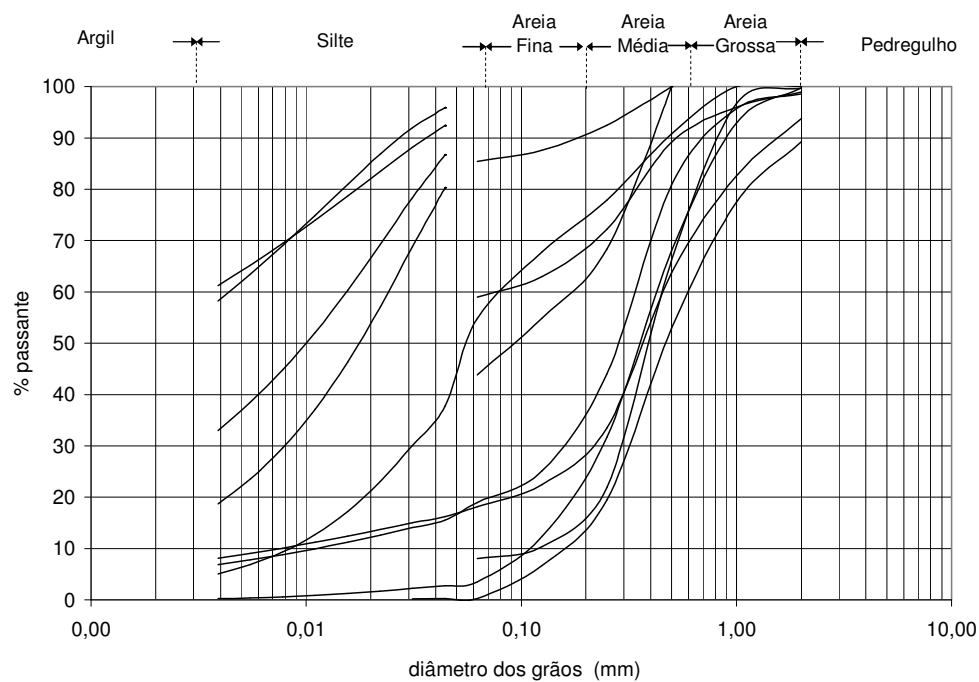
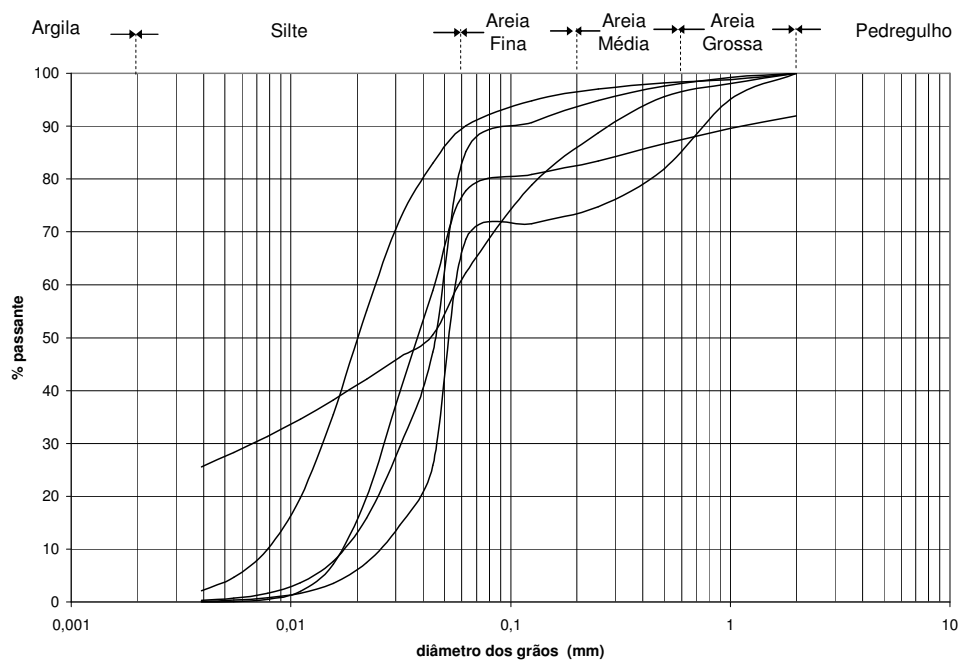


Figura 5.56 - Distribuição granulométrica das amostras coletadas nos dias 03/10/05 e 04/10/05.

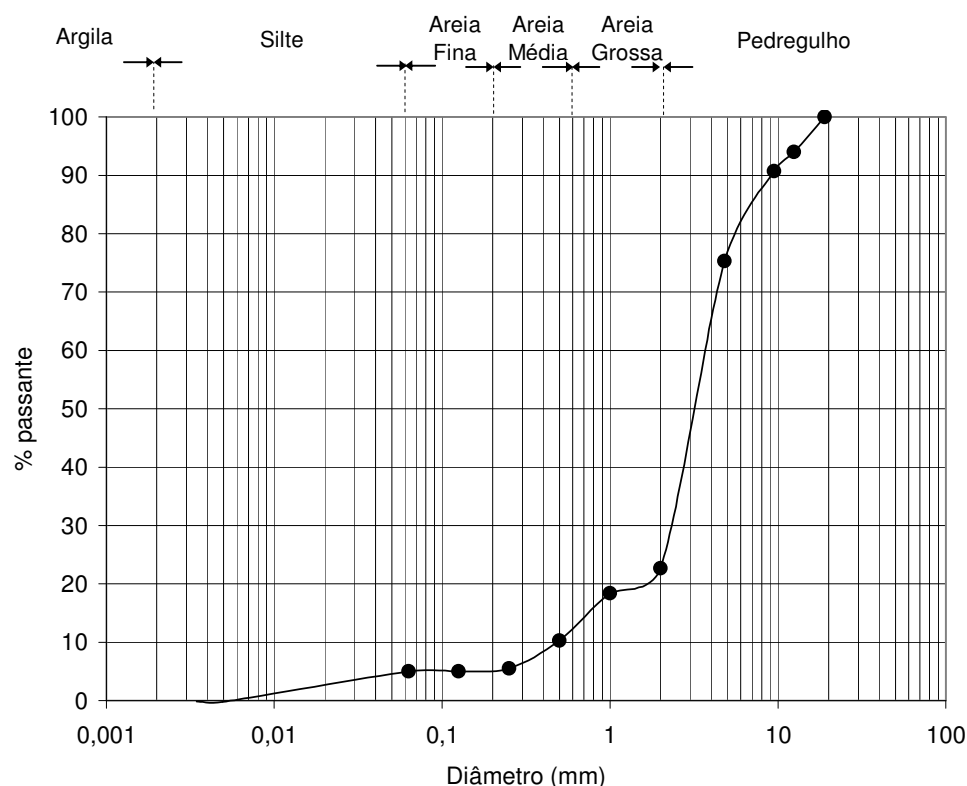
As amostras que permitiram em sua constituição uma análise completa, ou seja, a determinação da porção de areia por peneiramento seco e a determinação dos finos pelo ensaio do tubo de retirada pelo fundo, apresentam um diâmetro médio de aproximadamente 0,35 mm.

Na figura 5.57 são apresentadas as curvas granulométricas das amostras coletadas no evento do dia 23/12 submetidas ao ensaio de peneiramento e tubo de retirada pelo fundo. O diâmetro médio das partículas foi em torno de 0,04 mm e o material foi constituído principalmente por silte. Porém neste mesmo evento, algumas amostras foram submetidas aos ensaios de peneiramento e evaporação, sendo constituídas principalmente por areia.



**Figura 5.57 - Distribuição granulométrica das amostras coletadas nos dia 23/12/05.**

A figura 5.58 apresenta a curva granulométrica do material acumulado na calha após o evento do dia 4/10.



**Figura 5.58 - Distribuição granulométrica do material acumulado após o evento do dia 03 e 4/10.**

A partir das curvas apresentadas é possível constatar que o escoamento transporta partículas, que variam de muito finas a mais grosseiras, com o diâmetro médio variando de 0,01 mm a 12 mm. Confirmando o transporte do material presente nas sarjetas e áreas adjacentes pela drenagem.

O número limitado de eventos e a grande variabilidade no comportamento das precipitações não possibilitaram uma caracterização detalhada do processo complexo de transporte de sedimentos ao longo do sistema de drenagem. Por outro lado, estes eventos foram representativos, no sentido de representarem situações extremas de vazões máximas e mínimas. Além disso, a partir da análise dos eventos monitorados, foi possível quantificar algumas grandezas e verificar que o sedimento

que chega ao arroio é proveniente das sarjetas e áreas adjacentes.

O material proveniente somente das ruas é de difícil quantificação, uma vez que o escoamento carrega poluentes provenientes das áreas adjacentes às ruas e também pelo fato de que há ligações clandestinas de esgoto doméstico na canalização pluvial. Além disso, seria necessário quantificar a porcentagem de sedimento retido nas bocas de lobo.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa teve por objetivo contribuir com o estudo da acumulação propagação de sedimentos em superfícies impermeáveis. Busca-se conhecer e caracterizar o processo de acumulação de sedimentos em superfícies impermeáveis e analisar a carga de sedimentos que chega ao arroio proveniente das águas pluviais. O enfoque foi a quantificação e a comparação de sedimento seco de ruas com intensidade de urbanização semelhante, porém com intensidade de tráfego e declividade diferentes, a avaliação da carga total de sedimento proveniente da microdrenagem e a contribuição à modelagem do processo de acumulação dos sedimentos na superfície.

Os trabalhos de campo e laboratório ocorreram durante o período de abril a dezembro de 2005. As coletas de sedimento na sarjeta foram realizadas durante três períodos distintos de amostragens com duração média de 30 dias. As coletas de amostras líquidas ocorreram durante alguns eventos de precipitação significativos a fim de determinar a concentração de sedimentos em suspensão e a carga proveniente da drenagem. Os resultados obtidos por meio do monitoramento dos sedimentos secos diretamente na sarjeta foram comparados com os valores e comportamentos observados por outros autores em diferentes locais do mundo.

Foi possível, desta forma, entender melhor o processo de acumulação dos sedimentos em ambientes urbanos.

A carga total de sedimentos na sarjeta diminuiu após a maioria dos eventos de precipitação. Em geral, a carga livre diminuiu após todos os eventos de precipitação e a carga fixa manteve-se aproximadamente constante.

Dependendo da intensidade e da duração de cada evento de precipitação, parte dos sedimentos presentes na superfície pode se desagregar ou se dissolver. Pequenos eventos desagregam principalmente a carga livre, enquanto que eventos maiores podem desintegrar também a carga fixa. Dependendo da capacidade de transporte do escoamento, parte do sedimento acumulado é removido da superfície. O remanescente torna-se parte da carga fixa, uma vez que acaba fixando-se à superfície após o término do escoamento ao longo da sarjeta e após a secagem da superfície.

As análises granulométricas das amostras de sedimento seco indicaram um

diâmetro médio de aproximadamente 0,350 mm em ambas as ruas de amostragem, semelhante ao diâmetro encontrado por Vaze e Chiew (2002).

Foi observada variação no tamanho das partículas das cargas livre e fixa, mas em geral, suas características são semelhantes. Como esperado, os sedimentos constituintes da carga fixa são mais finos que aqueles da carga livre.

Em geral, os sedimentos ficam mais finos à medida que a acumulação ocorre, uma vez que os sedimentos são desagregados pela ação do vento e do tráfego de veículos. A carga livre fica mais fina ao longo dos dias secos comparada com a carga fixa, uma vez que as partículas da carga fixa que se encontram agregadas à superfície são mais finas e as partículas da carga livre são mais suscetíveis a serem desintegradas em partículas menores.

Os eventos de precipitação geralmente reduzem a quantidade de sedimentos da carga livre e aumentam o tamanho das partículas. Os eventos também aumentam a quantidade total e a proporção de material fino na carga fixa devido ao fato de que a chuva dissolve as partículas mais finas da carga livre, das quais algumas são carregadas pelo escoamento e outras permanecem agregadas à superfície em forma de carga fixa, resultando em um aumento de material fino na carga fixa.

A aplicação da equação proposta por Sartor and Boyd (1972 e 1974) apud Deletic et al. (1997) foi satisfatória, considerando as limitações deste trabalho experimental e da equação. Os parâmetros calibrados apresentaram valores maiores do que aqueles encontrados na bibliografia, provavelmente devido ao fato de que as ruas estudadas não apresentam nenhuma prática de limpeza periódica. A rua de maior tráfego apresentou, como esperado, um coeficiente de acumulação maior.

As análises das amostras líquidas, provenientes da microdrenagem, mostraram que a concentração de sedimentos variou de 8,0 a 6.000 mg/L, confirmando uma grande variabilidade dos valores.

A concentração de sedimentos no início da cheia, mesmo com a vazão bem reduzida, é mais elevada, apresentando um pico, que nos eventos mais significativos representa a presença do fenômeno da carga de lavagem das ruas.

Foi verificado que apenas o evento de maior precipitação transportou a carga

de sedimentos presente na rua, reafirmando que os eventos típicos de precipitação removem apenas uma parte dos sedimentos que estão na superfície.

A granulometria do material líquido amostrado indica que o escoamento transporta partículas, que variam de muito finas a mais grosseiras, confirmando o transporte do material presente nas sarjetas e áreas adjacentes pela drenagem.

O número limitado de eventos e a grande variabilidade no comportamento das precipitações não possibilitaram uma caracterização detalhada do processo complexo de transporte de sedimentos ao longo do sistema de drenagem. Por outro lado, esses eventos foram representativos no sentido de possibilitarem a quantificação de algumas grandezas, e verificar que o sedimento que chega ao arroio é proveniente das sarjetas e áreas adjacentes.

Os trabalhos experimentais realizados neste estudo se mostraram muito significativos na caracterização dos sedimentos presentes em superfícies asfálticas de ruas urbanas, bem como na verificação do carreamento destes pelo sistema de microdrenagem até o arroio.

Para trabalhos futuros na área de estudos, sugere-se:

- O estudo da representatividade de cada fonte de sedimentos em ambiente urbano, como as áreas adjacentes às ruas.
- Estudo englobando a análise de outros parâmetros de qualidade da água.
- O desenvolvimento de um modelo de acumulação que considere a influência da quantidade de precipitação ocorrida nos dias antecedentes ao período seco.
- Estudo detalhado de caracterização do processo de carreamento dos sedimentos ao longo do sistema de drenagem, incluindo o monitoramento nas bocas de lobo.
- Estudos sobre a ocorrência da carga de lavagem em saídas de sistemas de drenagem abordando a determinação da quantidade do volume crítico que é capaz de carregar a poluição presente nas superfícies, ao invés da determinação somente a carga de poluentes durante a primeira parte do evento.

## 7. REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Análise granulométrica dos solos, NBR-7181, 1984.

BENT, G.C., GRAY, J.R., SMITH, K.P., AND GLYSSON, G.D. A synopsis of technical issues for monitoring sediment in highway and urban runoff: U.S. Geological Survey Open File Report 00-497, 51, 2001.

BANNERMAN, R. T.; OWENS, D.W.; DODDS R.B.; HORNEWER, N.J. Sources of pollutants in Winconsin stormwater. Water Science Technology.v. 28, n. 3-5, p. 241-259, 1993.

BRANCO N.; PAIVA, J.B.D; PAIVA, E.M.C.D. Produção de sedimentos da bacia hidrográfica do arroio Vacacaí-Mirim - Avaliação preliminar. In: XVII Congresso Nacional del Agua e II Simposio de Recursos Hidricos del CONESUR, Santa Fe, Argentina, p. 444-451, 1998.

BRITES, A.P.; Avaliação da qualidade da água e dos resíduos sólidos no sistema de drenagem urbana. 2005. Dissertação de Mestrado. PPGEC - UFSM. Santa Maria, 2005.

BUTLER, D. & CLARK, P. Sediment management in urban drainage catchments. Construction Research and Information Association, CIRIA Report 134. London, 1995.

BUTLER, D.; THEDCHANAMOORTHY, S.; PAYNE, J.A. Aspects of surface sediment characteristics on an urban catchment in London. Water Science Technology.v. 25, n. 8, p. 13-19, 1992.

CARVALHO, N.O. Hidrossedimentologia Prática, CPRM, ELETROBRÁS, 1994.

CARVALHO, N. O. Guia de praticas sedimentométricas. Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de estudos e informações Hidrológicas, 154 p 2000.



DELETIC, A. The first flush load of urban surface runoff. *Water Resource*. v. 32, n. 8, p. 2462-2470, 1998.

DELETIC, A.; ASHLEY, R.; REST, D. Modelling input of fine granular sediment into drainage systems via gully-pots. *Water Research*. v. 34, n. 15, p. 3836-3844, 2000.

DELETIC, A.; MAKSIMOVIC, C.; IVETIC, M. Modelling of storm wash-off of suspended solids from impervious surfaces. *Journal of Hydraulic Research*. v. 35, n. 1, p. 99-118, 1997.

DELETIC, A. & ORR, D.W. (2005) Pollution buildup on road surfaces. *Journal of Environmental Engineering-ASCE*. v.131, n. 1, p. 391-396, 2005.

DUNCAN, H. Urban stormwater pollutant concentration and loads. In: Draft Australian Runoff Quality Guidelines. Chapter 13, Australia, 2003.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 412p, 1999..

GOMES, L.A.; CHAUDHRY, F.H. Aspectos qualitativos das águas de escoamento superficial urbano. In: IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, 1981.

GREENWAY, M.; LE MUTH, N. E JENKINS, G. Monitoring spatial and temporal changes in stormwater quality through a series of treatment trains. A case study - Golden Pond, Brisbane, Australia. *Global Solutions for Urban Drainage*, 2002.

GUPTA, K. & SAUL, A.J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows. *Water Resource*. v. 30, n.5, p. 1244-1252, 1996.

LLORET RAMOS, C. Erosão urbana e produção de sedimentos. In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.; BARROS, M.T. *Drenagem urbana*. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, cap.2, p.241-275, 1995.

MARTINS, E.S.P.R.; PAIVA, J.B.D. Quantidade dos recursos hídricos. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (Org.). Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. Editora ABRH, p.531-566. Porto Alegre, 2001.

MATOS, J.S.; DAVID, L.M.; PAVÃO, L. Qualidade de escoências pluviais em zonas urbanas e impacte em meios receptores. In: 8 Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 8, 1998, João Pessoa. Rio de Janeiro: ABES, v.2, p.334-347, 1998.

MUTHUKARUPPAN, M., CHIEW, F.H.S. AND WONG, T. (2002) Size distribution and partitioning of urban pollutants. Global Solutions for Urban Drainage, 2002. (CD-ROM).

NELSON, J.; BOOTH, D. B. Sediment sources in an urbanizing, mixed land-use watershed. Journal of Hydrology.v. 264, p. 51-68, 2002.

PAIVA, E.M.C.D.; PAIVA, J.B.D.; PARANHOS, R.M. Produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas rurais. In: PAIVA, E.M.C.D.; PAIVA, J.B.D. (Org.). Caracterização quali-quantitativa da produção de sedimentos. Santa Maria, RS, v. 1, p. 35-51, 2001.

PAIVA, E.M.C.D. & COSTAS, M.F.T. Produção de sedimento em bacia urbana. In: 5 Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, São Paulo: ABRH, v. 1, p. 423-432, 2003.

PAIVA, J.B.D. Padrão das precipitações em Santa Maria-RS. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. v.2. p. 221-229. Vitória, 1997.

PAZ, M. F.; GASTALDINI, M.C.C.; JORGE, M.P. Avaliação da qualidade do escoamento superficial da bacia alto da colina. In: XI SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro e Engenharia, Natal. 2004.

PORTO, M.F.A. aspectos qualitativos do escoamento superficial em áreas urbanas. Drenagem Urbana. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, Cap. 9, p. 187-414, 1995.

SCAPIN, J.; Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria - RS. 2005. Dissertação de Mestrado. PPGECC - UFSM.Santa Maria, 2005.

SRINIVASAN, V.S. & SIQUEIRA, M.T. A influência da distribuição granulométrica sobre o transporte sólido em canais erodíveis. Caracterização Quali-Quantitativa da Produção de Sedimentos, 2000.

TUCCI, C.E.M. & COLLISCHONN, W. Drenagem urbana e controle de erosão. In: TUCCI, C.E.M. & MARQUÊS, D.M.L.M. (Org.) Avaliação e controle da drenagem urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, p.119-127, 2000.

VAZE, J.; CHIEW, F.H.S. Comparative evaluation of urban storm water quality models. Water Resources Research., v. 39, n. 10, 2003.

VAZE, J.; CHIEW, F.H.S. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface. Urban Water. v. 4, n. 4, p 379-389, 2002.

VAZE, J.; CHIEW, F.H.S. Study of pollutant washoff from small impervious experimental plots. Water Resources Research. v. 39, n. 6, 2003.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A - PLANILHAS DE COLETA DE SEDIMENTO SECO E DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Tabela A1 - Precipitação e carga de sedimentos - Primeiro período de amostragem.

Data	P (mm/dia)	Carga de sedimentos na Rua Marquês do Herval (g/m²)						
		Livre zona 1	Fixa zona 1	Livre zona 2	Fixa zona 2	Livre total	Fixa Total	Total
31/03/05	5,59	171,21	55,00	110,13	13,93	281,36	68,95	350,31
01/04/05	89,23							
02/04/05	1,98	1,10	0,70	1,44	0,92	2,53	1,62	4,15
03/04/05	1,58	42,97	14,12	4,02	4,91	46,99	19,22	66,21
04/04/05		4,03	2,50	11,95	5,83	15,99	8,33	24,32
05/04/05		22,66	5,87	5,19	8,44	27,84	10,33	38,16
06/04/05		14,57	9,62	5,68	8,59	20,26	18,21	38,47
07/04/05	1,80	24,44	16,68	59,56	11,79	83,99	26,44	110,43
08/04/05	43,80							
09/42005		1,95	2,36	27,81	7,32	29,79	9,65	39,44
10/04/05	7,92							
11/04/05	5,46	8,66	8,46	9,31	2,34	17,98	10,81	28,79
12/04/05	61,63							
13/04/05	0,21							
14/04/05	3,42							
15/04/05	0,09	23,93	6,39	28,83	17,90	26,94	11,24	38,18
16/04/05		10,94	3,58	15,99	7,66	52,76	24,28	77,04
17/04/05		20,92	3,65	28,64	6,01	49,56	9,66	59,22
18/04/05		23,83	13,73	34,15	22,70	57,97	36,43	94,40
19/04/05	21,25							
20/04/05								
21/04/05		20,28	7,52	11,98	4,36	32,27	11,88	44,15
22/04/05		13,31	5,90	24,89	9,23	38,23	15,13	53,36
23/04/05								
24/04/05	33,88							
25/04/05	2,47	1,50	2,45	13,27	3,28	14,78	5,73	20,51
26/04/05		17,45	4,58	40,55	8,45	58,01	13,04	71,05
27/04/05		14,00	4,45	17,98	10,51	31,98	14,95	46,94
28/04/05		29,17	7,90	43,39	27,46	72,58	35,37	107,95
29/04/05		13,15	8,57	53,67	17,52	66,88	26,12	93,00
30/04/05		15,13	9,94	49,91	29,32	65,02	39,25	104,27
01/05/05		32,95	16,42	33,92	4,90	66,86	21,31	88,18
02/05/05		25,19	7,24	13,55	11,39	38,74	18,62	57,36
03/05/05		21,49	8,76	45,86	25,10	67,36	33,88	101,23
04/05/05								
05/08/05		20,62	15,71	41,80	23,73	62,46	39,41	101,87

Tabela A1 - Precipitação e carga de sedimentos - Primeiro período de amostragem.

...continuação

Data	P (mm/dia)	Carga de sedimentos na Rua Rigoberto Duarte (g/m <sup>2</sup> )		
		Livre total	Fixa Total	Total
31/03/05	5,59	59,91	33,41	93,32
01/04/05	89,23			
02/04/05	1,98	11,02	3,63	14,64
03/04/05	1,58	3,91	6,87	10,77
04/04/05		15,87	6,87	22,74
05/04/05		36,55	11,39	47,94
06/04/05		9,58	8,23	17,82
07/04/05	1,80	34,05	13,60	47,65
08/04/05	43,80			
09/42005		8,52	7,97	16,49
10/04/05	7,92			
11/04/05	5,46	9,66	16,13	25,79
12/04/05	61,63			
13/04/05	0,21			
14/04/05	3,42			
15/04/05	0,09	26,94	11,24	38,18
16/04/05		61,84	14,67	76,51
17/04/05		40,88	14,79	55,67
18/04/05		51,45	18,33	69,78
19/04/05	21,25			
20/04/05				
21/04/05		37,46	19,91	57,37
22/04/05		46,43	10,38	56,81
23/04/05				
24/04/05	33,88			
25/04/05	2,47	9,72	4,58	14,30
26/04/05		44,60	10,48	27,54
27/04/05		29,54	11,09	40,63
28/04/05		53,05	12,99	66,04
29/04/05		60,11	28,21	88,32
30/04/05		57,49	22,19	79,68
01/05/05		41,14	20,67	61,81
02/05/05		39,00	23,30	62,30
03/05/05		29,41	17,41	46,83
04/05/05		50,42	41,68	92,09
05/08/05		44,92	77,18	122,11

Tabela A2 - Precipitação e carga de sedimentos - Segundo período de amostragem.

Data	P (mm/dia)	Carga de sedimentos na Rua Marquês do Herval (g/m²)						Total
		Livre zona 1	Fixa zona 1	Livre zona 2	Fixa zona 2	Livre total	Fixa Total	
31/05/05		12,97	18,70	62,31	26,07	75,27	44,77	120,04
01/06/05		35,82	11,34	0,00	0,00	35,82	11,34	47,17
02/06/05		12,23	6,84	85,03	14,18	97,26	21,01	118,27
03/06/05		8,95	3,52	19,97	6,55	28,92	10,06	38,98
04/06/05		54,43	5,19	115,77	20,98	170,20	26,16	196,36
05/06/05		48,40	30,04	26,67	17,90	75,08	47,94	123,02
06/06/05		63,47	34,45	24,14	16,18	87,61	50,63	138,24
07/06/05		23,33	18,40	19,60	24,57	42,93	42,97	85,90
08/06/05		74,03	32,95	49,58	29,37	123,61	62,32	185,93
09/06/05		43,21	17,65	47,86	13,15	91,07	30,80	121,87
10/06/05	8,24							
11/06/05	6,23	111,65	34,67	34,75	16,02	146,40	50,69	197,09
12/06/05	13,06	135,67	22,49	42,43	10,29	178,10	32,78	210,87
13/06/05	42,52							
14/06/05	2,21							
15/06/05	7,7	6,52	13,86	11,54	6,49	18,06	20,34	38,40
16/06/05	3,74							
17/06/05	0,76							
18/06/05	1,68	51,82	23,43	20,00	6,44	71,82	29,87	101,69
19/06/05	1,66							
20/06/05		11,04	18,50	15,87	8,64	26,90	27,14	54,04
21/06/05		37,26	24,54	13,70	12,77	50,96	37,31	88,27
22/06/05		36,21	28,01	12,11	8,93	48,32	36,94	85,26
23/06/05		135,71	43,39	62,32	13,44	198,02	56,83	254,85
24/06/05		83,27	37,85	85,24	46,53	168,51	84,38	252,89
25/06/05	7,86							
26/06/05	21,23							
27/06/05		24,04	34,74	9,95	49,34	34,00	84,08	118,08
28/06/05		16,28	6,90	34,65	10,97	50,93	17,87	68,80
29/06/05		29,74	5,61	18,34	21,07	48,07	26,67	74,75
30/06/05		27,60	11,02	29,06	3,25	56,65	14,27	70,92
01/07/05								
02/07/05		37,07	27,91	59,04	39,51	96,12	67,42	163,54
03/07/05	1,66							
04/07/05	7,17							
05/07/05		26,39	26,78	25,41	14,07	51,80	40,85	92,65
06/07/05								
07/07/05		50,47	17,26	28,65	5,14	79,13	22,40	101,53

Tabela A2 - Precipitação e carga de sedimentos - Segundo período de amostragem.

...continuação

Data	P (mm/dia)	Carga de sedimentos na Rua Rigoberto Duarte (g/m²)		
		Livre total	Fixa Total	Total
31/05/05		17,20	5,02	22,22
01/06/05				
02/06/05		34,78	10,20	44,98
03/06/05		122,95	15,96	138,92
04/06/05		59,76	36,40	96,16
05/06/05		98,19	53,67	151,86
06/06/05		15,90	16,82	32,73
07/06/05		48,80	22,33	71,12
08/06/05		50,27	19,59	69,86
09/06/05		73,24	27,69	100,93
10/06/05	8,24			
11/06/05	6,23	122,18	52,64	174,82
12/06/05	13,06	3,73	8,31	12,04
13/06/05	42,52			
14/06/05	2,21			
15/06/05	7,7	45,90	59,78	105,67
16/06/05	3,74			
17/06/05	0,76			
18/06/05	1,68	28,27	18,38	46,65
19/06/05	1,66			
20/06/05		30,58	29,73	60,32
21/06/05		78,38	44,35	122,73
22/06/05		21,47	32,08	53,55
23/06/05		83,70	35,37	119,07
24/06/05		108,75	93,42	202,17
25/06/05	7,86			
26/06/05	21,23			
27/06/05		6,65	8,31	14,97
28/06/05		37,99	11,40	49,39
29/06/05		16,42	13,02	29,44
30/06/05		68,98	37,52	106,50
01/07/05				
02/07/05		60,22	24,06	84,27
03/07/05	1,66			
04/07/05	7,17			
05/07/05		32,92	18,76	51,68
06/07/05				
07/07/05		30,22	11,99	42,21



Tabela A3 - Precipitação e carga de sedimentos - Terceiro período de amostragem.

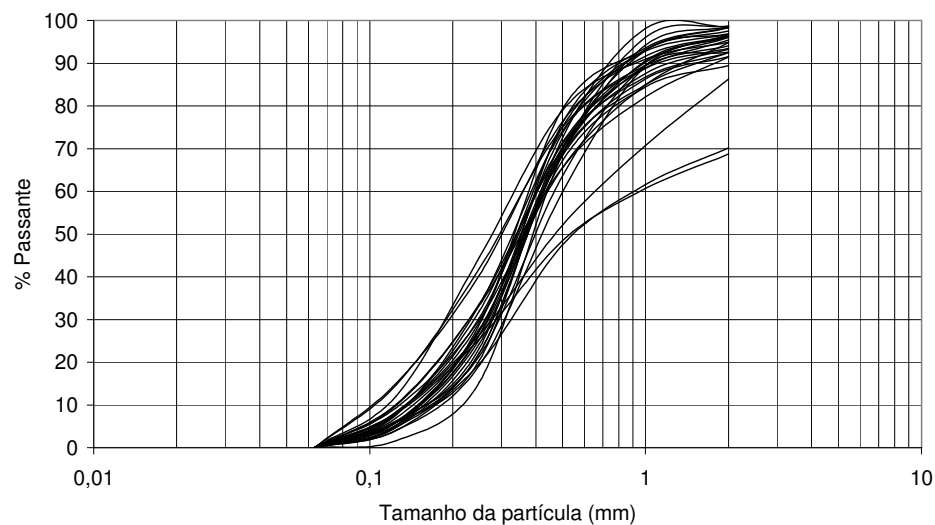
Data	P (mm/dia)	Carga de sedimentos na Rua Marquês do Herval (g/m²)						Total
		Livre zona 1	Fixa zona 1	Livre zona 2	Fixa zona 2	Livre total	Fixa Total	
24/10/05	0,7	53,43	15,75	29,83	2,67	83,26	18,42	101,69
25/10/05	0,09							
26/10/05	0,07	19,05	24,50	17,41	5,07	36,47	29,58	66,04
27/10/05	11,34	82,21	9,33	34,06	12,98	116,27	22,31	138,59
28/10/05		36,45	11,25	8,58	11,05	45,03	22,30	67,34
29/10/05		24,19	11,06	14,97	7,88	39,16	18,94	58,10
30/10/05								
31/10/05		27,18	7,42	21,08	1,46	48,26	8,89	57,15
01/11/05		14,83	18,19	16,85	18,68	31,69	36,86	68,55
02/11/05		26,35	6,23	50,26	15,12	76,61	21,35	97,97
03/11/05		180,37	25,41	29,14	4,85	209,51	30,26	239,77
04/11/05	3,17	70,93	14,04	149,80	55,68	220,73	69,73	290,46
05/11/05	4,44							
06/11/05	29,97							
07/11/05								
08/11/05								
09/11/05	0,04							
10/11/05		18,43	9,19	22,05	8,86	40,48	18,05	58,53
11/11/05		22,52	7,56	27,21	9,33	49,74	16,89	66,63
12/11/05								
13/11/05								
14/11/05								
15/11/05								
16/11/05		35,92	5,72	57,74	17,94	93,66	23,66	117,32
17/11/05	4,44							
18/11/05								
19/11/05								
20/11/05								
21/11/05								
22/11/05	0,63							
23/11/05								
24/11/05	25,61							
25/11/05								
26/11/05								
27/11/05								
28/11/05								
29/11/05								
30/11/05								
01/12/05	0,53							
02/12/05								
03/12/05								
04/12/05								
05/12/05	76,12							
06/12/05		4,05	4,75	6,38	3,55	10,44	8,30	18,74
07/12/05		12,67	5,13	14,59	4,89	27,26	10,03	37,28
08/12/05		25,30	11,01	17,57	4,24	42,87	15,25	58,12
09/12/05		17,78	4,25	17,18	3,87	34,96	8,12	43,08
10/12/05		4,37	12,57	7,61	8,66	11,99	21,23	33,22
11/12/05								
12/12/05		48,17	9,97	14,96	2,08	63,13	12,04	75,18
13/12/05		18,46	4,97	34,85	8,78	53,32	13,75	67,07
14/12/05		26,34	13,51	32,88	14,47	59,22	27,98	87,20
15/12/05		30,35	4,76	35,47	5,92	65,82	10,68	76,50
16/12/05	3,4	22,90	8,57	42,83	12,22	65,74	20,79	86,53
17/12/05	0,09	44,64	19,11	18,35	2,90	62,98	22,02	85,00
18/12/05								
19/12/05		18,78	2,94	31,72	3,48	50,50	6,43	56,93

Tabela A3 - Precipitação e carga de sedimentos - Terceiro período de amostragem.

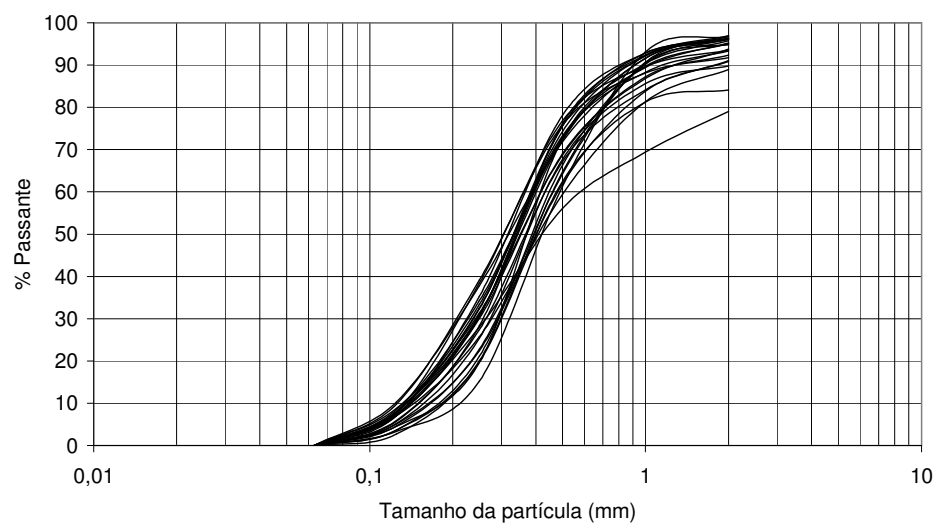
...continuação

Data	P (mm/dia)	Carga de sedimentos na Rua Rigoberto Duarte (g/m²)		
		Livre total	Fixa Total	Total
24/10/05	0,7	32,75	32,94	65,69
25/10/05	0,09			
26/10/05	0,07	23,58	27,10	50,68
27/10/05	11,34	79,77	28,49	108,26
28/10/05		49,90	26,92	76,82
29/10/05		39,71	21,03	60,74
30/10/05				
31/10/05		91,30	40,23	131,53
01/11/05		51,32	24,94	76,26
02/11/05		123,60	19,36	142,96
03/11/05		200,38	40,81	241,19
04/11/05	3,17	105,75	25,84	131,59
05/11/05	4,44			
06/11/05	29,97			
07/11/05				
08/11/05				
09/11/05	0,04			
10/11/05		40,62	37,81	78,43
11/11/05		30,43	15,26	45,69
12/11/05				
13/11/05				
14/11/05				
15/11/05				
16/11/05		122,01	37,39	159,40
17/11/05	4,44			
18/11/05				
19/11/05				
20/11/05				
21/11/05				
22/11/05	0,63			
23/11/05				
24/11/05	25,61			
25/11/05				
26/11/05				
27/11/05				
28/11/05				
29/11/05				
30/11/05				
01/12/05	0,53			
02/12/05				
03/12/05				
04/12/05				
05/12/05	76,12			
06/12/05		9,3754	15,1672	24,5426
07/12/05		25,7482	6,7992	32,5474
08/12/05		23,978	5,8216	29,7996
09/12/05		35,3826	5,2726	40,6552
10/12/05		14,7526	15,7674	30,52
11/12/05				
12/12/05		65,3956	16,454	81,8496
13/12/05		24,7468	10,5556	35,3024
14/12/05		61,9636	18,973	80,9366
15/12/05		24,9668	10,724	35,6908
16/12/05	3,4	63,8648	15,7404	79,6052
17/12/05	0,09	36,9628	8,5416	45,5044
18/12/05				
19/12/05		37,0292	11,2258	48,255

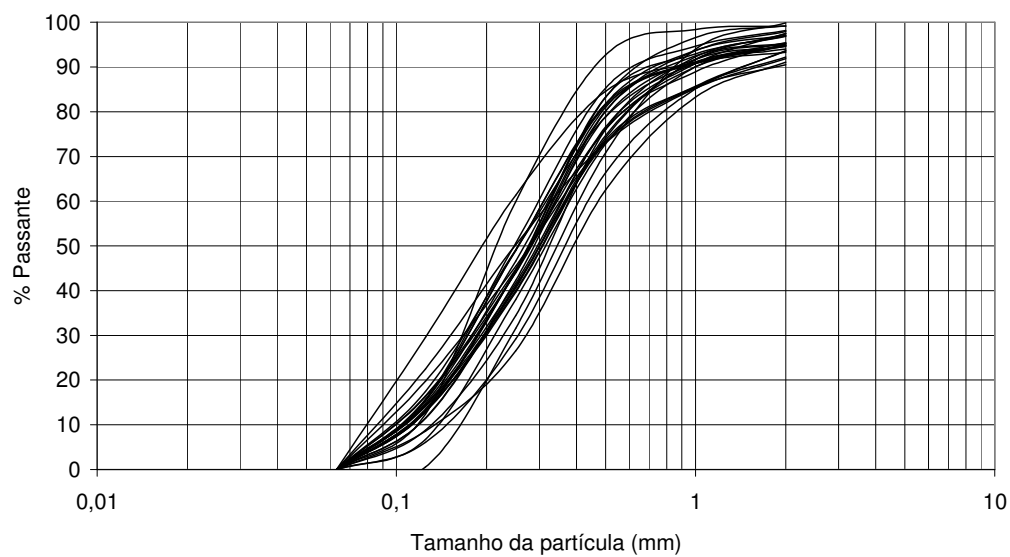
## APÊNDICE B - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS DE SEDIMENTO SECO



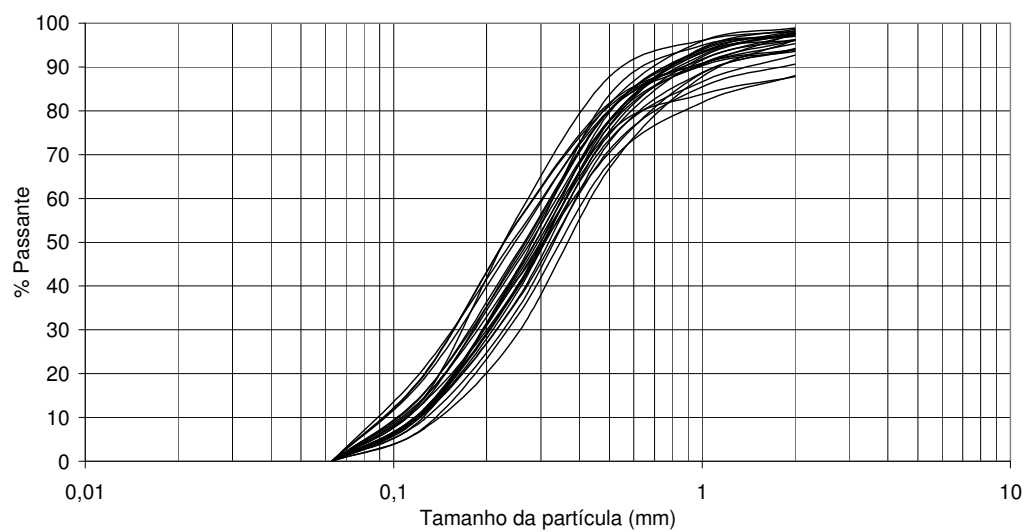
**Figura B1 - Distribuição granulométrica da carga livre referente ao segundo período de amostragem da rua Marquês do Herval.**



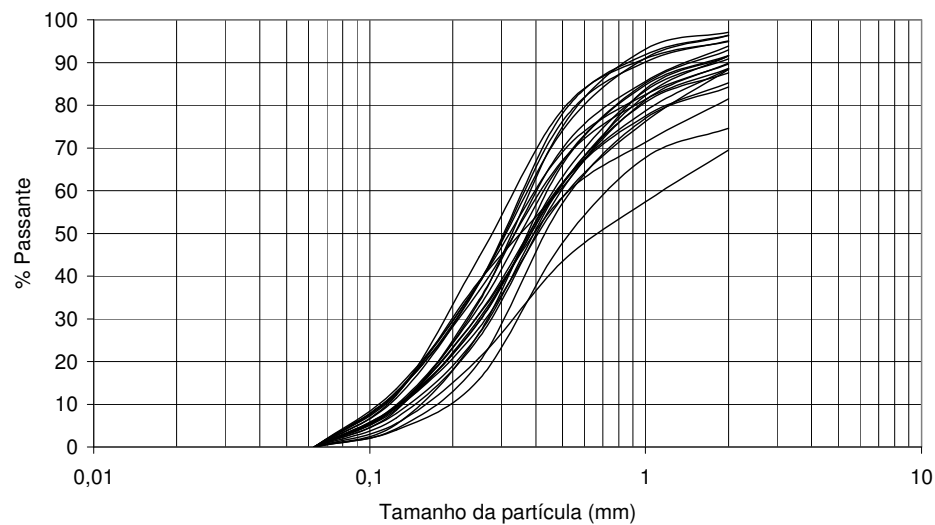
**Figura B2 - Distribuição granulométrica da carga livre referente ao terceiro período de amostragem da rua Marquês do Herval.**



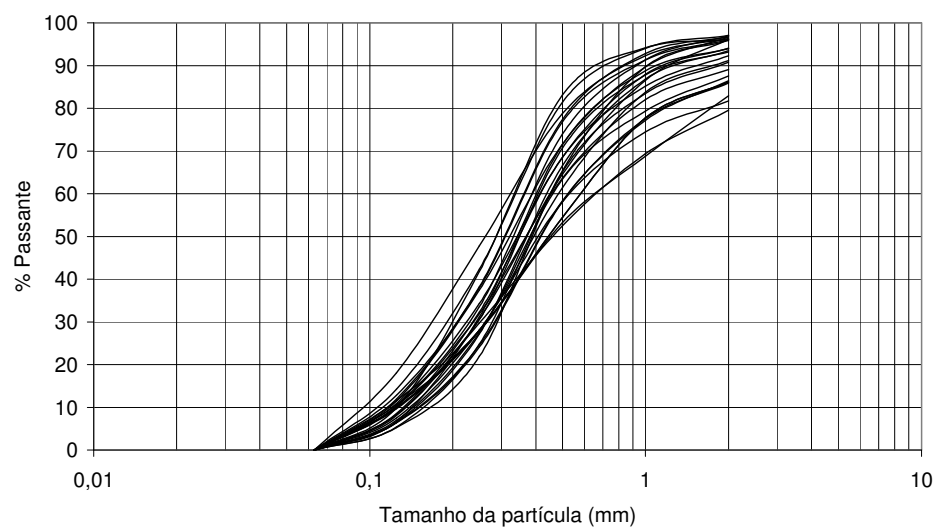
**Figura B3 - Distribuição granulométricas da carga fixa referente ao segundo período de amostragem da rua Marquês do Herval.**



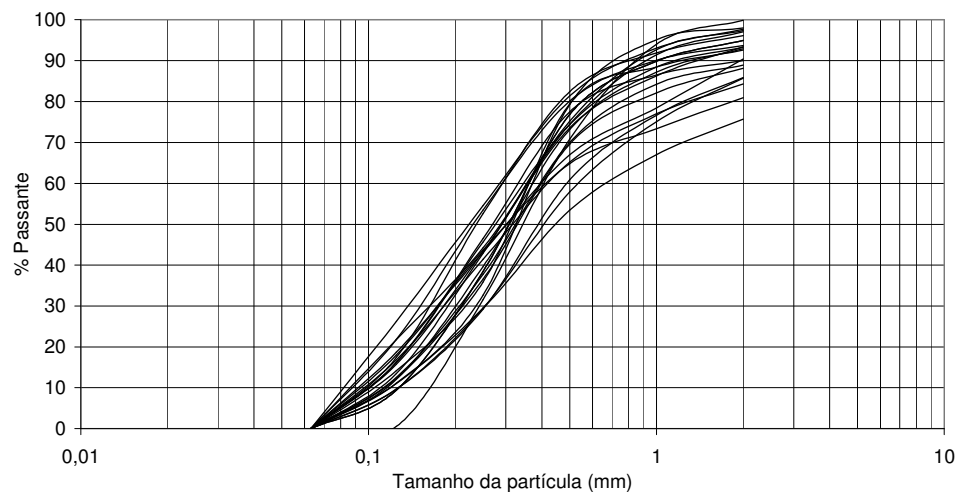
**Figura B4 - Distribuição granulométricas da carga fixa referente ao terceiro período de amostragem da rua Marquês do Herval.**



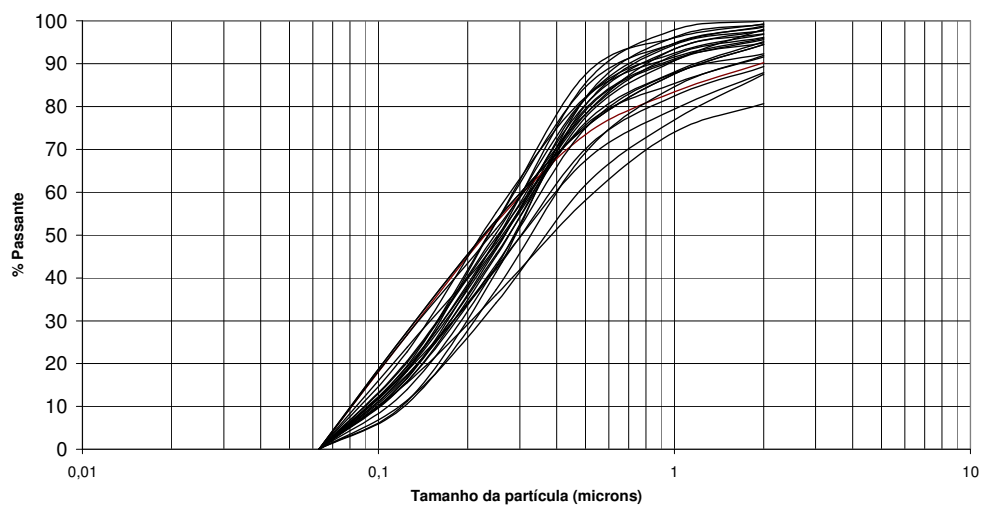
**Figura B5 - Distribuição granulométricas da carga livre referente ao segundo período de amostragem da rua Rigoberto Duarte.**



**Figura B6 - Distribuição granulométricas da carga livre referente ao terceiro período de amostragem da rua Rigoberto Duarte.**



**Figura B7 - Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao segundo período de amostragem da rua Rigoberto Duarte.**



**Figura B8 - Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao terceiro período de amostragem da rua Rigoberto Duarte.**