

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

DISSERTAÇÃO

Avaliação da remoção de material particulado  
em canal raso gramado

ALEXANDRE HIDEKI SHINZATO

Prof.Orientador: Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

São Carlos

2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

Avaliação da remoção de material particulado  
em canal raso gramado

Alexandre Hideki Shinzato

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

São Carlos

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

S556ar      Shinzato, Alexandre Hideki.  
Avaliação da remoção de material particulado em canal raso gramado / Alexandre Hideki Shinzato. -- São Carlos : UFSCar, 2015.  
s. p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2015.

1. Drenagem urbana. 2. Poluição difusa. 3. Remoção de poluentes. 4. Canal gramado. 5. Modelagem fenomenológica. I. Título.

CDD: 628.21 (20ª)

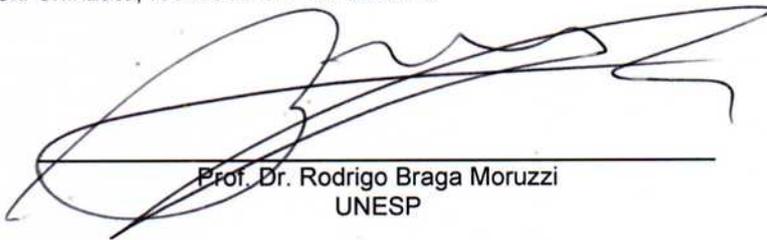


---

**Folha de Aprovação**

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Alexandre Hideki Shinzato, realizada em 10/04/2015:



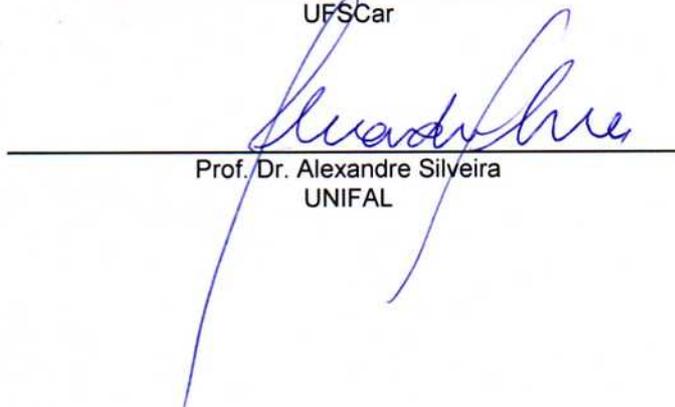
---

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi  
UNESP



---

Prof. Dr. Ademir Paceli Barbassa  
UFSCar



---

Prof. Dr. Alexandre Silveira  
UNIFAL

***A todas as pessoas que participaram e em especial à minha família e meu avô, para os quais dedico o trabalho.***

## **Agradecimento**

Este trabalho foi possível com o apoio e muita ajuda de minha família, que estive em todas as épocas dando forças nos melhores e piores momentos pelos quais passei.

Agradeço aos antigos e novos amigos que fiz durante esse tempo. Todos foram importantes nestes momentos, pois me ajudaram de alguma forma, me ensinando, me motivando e me fazendo rir. Amigos que levo comigo para sempre!

Agradeço a todos os professores que auxiliaram a realizar este trabalho, por todo seu conhecimento, experiência e às vezes, aquele puxão de orelha que sempre me fez voltar a focar no meu objetivo.

Agradeço a Deus e todos os amigos do alto que me fortaleceram em momentos difíceis e me mostraram o quão longe eu posso chegar, mantendo sempre a minha fé para a meta de vida que tenho.

## RESUMO

O estudo desenvolvido analisou o comportamento de remoção de sedimento para um canal gramado construído em escala real, 100m de extensão, declividade de 2% e largura de base de 0,7m, localizado na Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP. Para tal análise, foram simulados escoamentos superficiais para três volumes de descarregamentos: 5; 7; 10m<sup>3</sup>, representados cada um com seu respectivo hidrograma e altura de lâmina pela passagem da onda de cheia. Estes escoamentos foram misturados com o material particulado produzido a partir do solo local da região do *campus*, peneirado para dimensões menores que 75µm, o qual foi utilizado para variação da concentração inicial para os ensaios realizados.

Os dados experimentais foram ajustados a um modelo de decaimento de primeira ordem, em escoamento ideal pistonado por meio de regressão não linear, usando os parâmetros cinéticos de decaimento ( $kd$ ) e de concentração de equilíbrio ( $C^*$ ). As frações removidas e o ajuste matemático foram avaliados e realizados para cada evento isolado, ao longo do comprimento do canal gramado e monitorados em 26 posições. O pico dos hidrogramas investigados foi da ordem de  $11 \pm 2$  L/s, e o tempo de base ( $t_B$ ) determinado no ponto de descarregamento no canal variou de 15, 25 e 35 minutos. O tempo de trânsito no canal ( $t_T$ ) foi da ordem de  $10,5 \pm 2,5$  minutos, correspondente à velocidade de  $0,14 \pm 0,02$  m/s. A eficiência máxima de remoção de material particulado ao longo do comprimento do canal gramado variou de 47 a 81% em posições de 20 a 90m. Considerando todas as concentrações investigadas, verificou-se que para  $t_B$  de 15 minutos, a média das máximas eficiências foram da ordem de  $64 \pm 3\%$  para posição de  $31 \pm 26$ m. Para  $t_B$  de 25 minutos a média das máximas foram da ordem de  $73 \pm 3\%$  para posições de  $59 \pm 24$ m. Finalmente, para  $t_B$  de 35 minutos a média das máximas eficiências obtidas foram da ordem de  $65 \pm 3\%$  nas posições de  $73 \pm 15$ m. O quociente  $t_B/t_T$  apresentaram correlação de 0,98 com a posição de máxima eficiência. As posições de máxima remoção estão relacionadas à constante de decaimento ( $kd$ ). Verificou-se que 70% dos valores da constante de decaimento ( $kd$ ) estão entre 0,005 e 0,015 s<sup>-1</sup>, sendo que ao desconsiderar o hidrograma representado por  $t_B$  de 15 minutos, 90% dos dados estão contidos no intervalo  $0,005 \leq kd \leq 0,015$  s<sup>-1</sup> e 85% no intervalo  $0,007 \leq kd \leq 0,012$  s<sup>-1</sup>. Foi identificada relação direta e proporcional da concentração de equilíbrio ( $C^*$ ) e concentrações iniciais ( $C_0$ ).

Palavras-chave: drenagem urbana, poluição difusa, remoção de sólidos suspensos, canal gramado, modelagem fenomenológica.

### **Abstract**

*The study conducted examined the sediment removal behavior for a lawn channel built full-scale, 100 m in length, slope of 2% and wide base of 0.7 m in the Federal University of São Carlos, San Carlos - SP. For this analysis, we simulated runoff for three volumes of discharges 5; 7; 10 m<sup>3</sup>, represented each with their respective hydrograph and blade height by passing the flood wave. These flows were mixed with the particulate material produced from the local ground of the campus area, sieved to smaller than 75 micron, which is used for varying the initial concentration for tests.*

*The experimental data were fit to a model first order decay, Meira optimum slug flow in through non-linear regression using decay kinetic parameters ( $k_d$ ) and equilibrium concentration ( $C^*$ ). Fractions removed and the mathematical adjustment were evaluated and executed for each single event along the length of the lawn channel monitored in 26 positions. The peak of the hydrograph was investigated in the range of  $11 \pm 2$  L / s and time base ( $t_b$ ) determined at the unloading point on the channel varied from 15, 25 and 35 minutes. The transit time in the channel ( $t_T$ ) was approximately  $10.5 \pm 2.5$  m, corresponding to  $0.14 \pm$  speed  $0.02$  m / s. The maximum efficiency of particulate matter removing over the lawn channel length ranged from 47 to 81% in 20-90 m positions. Whereas all concentrations of investigates, it was found that for 15 minutes  $t_b$ , the average maximum efficiencies were on the order of  $64 \pm 3\%$  to  $\pm 26$  position of 31 m.  $t_b$  to 25 minutes the average maximum were of the order of  $73 \pm 3\%$  to  $59 \pm 24$  m positions. Finally, for 35 minutes  $t_b$  the average maximum efficiencies were obtained in the range of  $65 \pm 3\%$  in the  $73 \pm 15$  m positions. The ratio  $t_b / t_T$  correlated 0.98 with the position of maximum efficiency. The maximum removal positions are related to the decay constant ( $K_d$ ). It was found that 70% of the values of the decay constant ( $K_d$ ) is between  $0.005$  and  $0.015$  s<sup>-1</sup>, and to disregard the hydrograph represented by  $t_b$  15 minutes, 90% of the data is contained in it Halftone  $0.005 K_d \leq \leq 0.015$  s<sup>-1</sup> and 85% in the range  $0.007 \leq 0.012 \leq K_d$  s<sup>-1</sup>. It was identified direct and proportional relation of the equilibrium concentration ( $C^*$ ) and initial concentration ( $C_0$ ).*

**Keywords:** *urban drainage, diffuse pollution, removal of suspended solids, lawn channel, phenomenological modeling.*

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2. BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1 nova concepção de sistema de drenagem urbana</b> .....	<b>20</b>
2.1.1    Sistemas Sustentáveis de Drenagem e Técnicas compensatórias.....	22
<b>2.2 remoção de sedimentos por vegetação (grama)</b> .....	<b>26</b>
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1 Primeira etapa: preparativos para o ensaio de remoção de sedimentos no canal</b> .....	<b>31</b>
3.1.1    Descrição da área de estudo .....	31
3.1.2    Dimensões e características do canal gramado .....	32
3.1.3    Características do solo local .....	34
3.1.4    Simulação do escoamento superficial com sólidos suspensos totais ..	35
3.1.5    Instalação dos coletores de amostras .....	40
3.1.6    Coleta do nível da lâmina de água ao longo do canal .....	42
3.1.7    ensaio em campo utilizando material particulado .....	42
3.1.8    ensaio para a determinação da curva turbidez em relação À concentração de sólidos suspensos totais por litro .....	43
3.1.9    . análise de remoção de sedimentos ao longo do canal gramado .....	44
<b>3.2 Segunda etapa: modelagem de remoção do material particulado</b> .....	<b>45</b>
3.2.1    Modelo de remoção de sedimentos de decaimento cinético de primeira ordem “k-c” .....	45
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>48</b>
<b>4.1 Análise do comportamento de remoção de material particulado</b> .....	<b>48</b>
<b>4.2 Aplicação do modelo de remoção por decaimento exponencial “k-C”</b> .....	<b>59</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>67</b>
<b>6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>69</b>

## Lista de Figuras

Figura 1. Canal gramado em área residencial, Malmo, Suécia. ....	17
Figura 2. Perfil de um canal gramado com utilização de árvores em um de seus lados.....	17
Figura 3. Canal gramado dentro do <i>campus</i> São Carlos – UFSCar.....	18
Figura 4. Entrada da água utilizada para simulação de escoamento superficial no canal.....	19
Figura 5. Gráfico do pico de cheia sem controle com LID (1), pico de cheia com LID e mesmo tempo de concentração na pré-urbanização (6), pico de cheia na condição de pré-ocupação. ....	21
Figura 6. Canal gramado, localizado na microbacia de pesquisa do grupo G-hidro, situado na região norte da UFSCar, <i>campus</i> São Carlos.....	23
Figura 7. Hidrograma para chuvas de tempo de retorno de 2 anos (esquerda) e pico de cheia de tempo de retorno de 100 anos (direita), mostrando a diferença entre área urbanizada, área com uso de LID e área de pré-ocupação. ....	24
Figura 8. Nível de sedimentação apresentado para área pré-urbanizada, área de urbanização de alto impacto e urbanização com LID.....	24
Figura 9. Imagem demonstrando as áreas de estudo para diferentes coberturas superficiais, área pavimentada com árvore; pavimentada; e gramada, analisando a redução do escoamento superficial. ....	26
Figura 10. Plano de infiltração localizado do entorno de estacionamento (5000m <sup>2</sup> ) e departamento de Medicina II e Gerontologia, localizado na Microbacia experimental do grupo de pesquisa GHIDRO – UFSCar, <i>campus</i> São Carlos. .	27
Figura 11. Caminhos preferenciais de escoamento superficial para estudo de faixa de grama. ....	29
Figura 12. Canal gramado localizado paralelo a extensão de rodovia, localizado em Oxford. ....	29
Figura 13. Demarcação da microbacia de estudo do grupo de pesquisa G-Hidro, no interior do <i>campus</i> .....	31
Figura 14. Tubulação de saída do plano de infiltração no início do canal gramado. .	32
Figura 15. Ligação da drenagem predial da Medicina com o canal gramado. ....	33
Figura 16. Perfil do canal gramado, dimensão em metros (sem escalas).....	33
Figura 17. Perfil do canal gramado em campo. ....	34
Figura 18. Reservatório de 5m <sup>3</sup> utilizado para descarregamento no canal. ....	36
Figura 19. Reservatórios de 2m <sup>3</sup> e 5m <sup>3</sup> utilizados para aumento do volume de descarregamento no canal.....	38
Figura 20. Descarregamento do reservatório no canal para volume de reservatório de 10m <sup>3</sup> .....	38
Figura 21. Hidrograma da chuva simulada por meio do descarregamento do reservatório de 10m <sup>3</sup> . ....	39
Figura 22. Coletor utilizado para a coleta das amostras.....	40
Figura 23. Vista seccionada em planta do canal gramado, com indicação do reservatório para descarregamento e dos coletores espaçados ao longo do comprimento do canal. A vista foi seccionada na posição indicada, para facilitar visualização. Em detalhe, fotografia do coletor ao lado de um objeto de 12cm. Sem Escala. ....	41
Figura 24. Perfil e dimensão dos coletores de amostra utilizados em campo. ....	41

Figura 25. Medição da altura da lâmina de água com o auxílio de uma estaca de madeira, realizada para os pontos amostrais (0,15, 30, 45, 60, 75, 90m).....	42
Figura 26. Mistura de água com bomba para homogeneizar o material particulado.	43
Figura 27. Relação entre SST e Turbidez construída para o material particulado introduzido no reservatório de descarregamento no canal gramado. ....	44
Figura 28. Exemplo da curva de decaimento exponencial em função do comprimento. ....	47
Figura 29. Registros de lâmina de água (H1(t); H2(t) e H3(t)) na posição zero do canal gramado, correspondente ao ponto de descarregamento dos volumes reservados de 5, 7 e 10m <sup>3</sup> , respectivamente. ....	48
Figura 30. Posição dos pontos de amostragem (m) em que a média das cinco maiores eficiências foi obtida para cada hidrograma e concentrações iniciais (mg/L) ao canal gramado. Os rótulos representam a média das 5 maiores eficiências ao longo do comprimento do canal gramado.....	54
Figura 31. Altura média de seis medidas de lâmina (cm) de água para diferentes tempos (min) após descarregamento do reservatório em diferentes posições (m) do canal gramado. t <sub>B</sub> de 15 min. para medida realizada no tempo 15 min. t <sub>B</sub> /t <sub>T</sub> de 1,4. ....	58
Figura 32. Altura média de cinco medidas de lâmina de água (cm) para diferentes tempos (min) após descarregamento do reservatório em diferentes posições do canal gramado (m). t <sub>B</sub> de 25 min. para medidas realizadas nos tempos 15, 20 e 25 min. t <sub>B</sub> /t <sub>T</sub> de 2,4. ....	58
Figura 33. Altura média de quatro medidas de lâmina de água (cm) para diferentes tempos (min) após descarregamento do reservatório em diferentes posições do canal gramado (m). t <sub>B</sub> de 35 min. para medidas realizadas nos tempos 15, 20, 25, 30 e 35 min. t <sub>B</sub> /t <sub>T</sub> de 3,3.....	59
Figura 34. Altura média de quinze medidas de lâmina de água (cm) para medida no tempo 15 minutos após descarregamento do reservatório em diferentes posições do canal gramado (m). t <sub>B</sub> de 15, 25 e 35 min. t <sub>B</sub> /t <sub>T</sub> de 1,4; 2,4 e 3,33, respectivamente. ....	59
Figura 35. Concentração residuais remanescentes de material particulado medidas e simuladas (mg/L) com relação à posição (m). Resultados em unidades de turbidez no eixo principal das ordenadas e em sólidos suspensos totais no eixo secundário das ordenadas. Condições dos ensaios: Co de 195mg.L <sup>-1</sup> ; q de 0,20 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .s); t <sub>B</sub> de 15 min; t <sub>B</sub> /t <sub>T</sub> de 1,4. ....	60
Figura 36. Concentração residuais remanescentes de material particulado medidas e simuladas (mg/L) com relação à posição (m). Resultados em unidades de turbidez no eixo principal das ordenadas e em sólidos suspensos totais no eixo secundário das ordenadas. Condições dos ensaios: Co de 195 mg.L <sup>-1</sup> ; q de 0,15m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .s); t <sub>B</sub> de 25 min; t <sub>B</sub> /t <sub>T</sub> de 2,4. ....	61
Figura 37. Concentração residuais remanescentes de material particulado medidas e simuladas (mg/L) com relação à posição (m). Resultados em unidades de turbidez no eixo principal das ordenadas e em sólidos suspensos totais no eixo secundário das ordenadas. Condições dos ensaios: Co de 195 mg.L <sup>-1</sup> ; q de 0,14m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .s); t <sub>B</sub> de 35 min; t <sub>B</sub> /t <sub>T</sub> de 3,3. ....	61
Figura 38. Valores da constante de decaimento (kd) para diferentes hidrogramas e concentrações iniciais (Co) afluentes ao canal gramado. ....	65
Figura 39. Relação entre as concentrações de equilíbrio (C*) para diferentes hidrogramas e concentrações iniciais (Co) afluentes ao canal gramado .....	66

Figura 40. Valores de  $C^*$  calculados e  $C^*$  medidos, sendo os dados medidos obtidos pela média dos últimos 20m do canal nas posições de 80, 90 e 100m.....66

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Dimensão do canal gramado.....	33
Tabela 2. Classificação do solo proveniente do local construído o canal gramado...35	
Tabela 3. Velocidade de escoamento longitudinal máxima correspondente à altura de lâmina máxima. ....	49
Tabela 4. Desempenho do canal gramado na remoção de material particulado em suspensão (%) em 26 pontos de amostragem, medido por meio de 6 descarregamentos de volume de $5\text{m}^3$ (registro de lâmina H1(t), vazão de entrada de $10,0\text{L/s}$ , $q$ de $0,20\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{s})$ e $t_B$ de 15 min) com tubo curto de 75mm de diâmetro nominal em 6 diferentes concentrações iniciais ( $C_0$ ).....	49
Tabela 5. Desempenho do canal gramado na remoção de material particulado em suspensão (%) em 26 pontos de amostragem, medido por meio de 5 descarregamentos de volume de $7\text{m}^3$ (registro de lâmina H2(t), vazão de entrada de $12,2\text{L/s}$ , $q$ de $0,15\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{s})$ e $t_B$ de 25 min) com tubo curto de 75mm de diâmetro nominal em 5 diferentes concentrações iniciais ( $C_0$ ).....	50
Tabela 6. Desempenho do canal gramado na remoção de material particulado em suspensão (%) em 26 pontos de amostragem, medido por meio de 4 descarregamentos de volume de $10\text{m}^3$ (registro de lâmina H3(t), vazão de entrada de $9,2\text{L/s}$ , $q$ de $0,14\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{s})$ e $t_B$ de 35 min) com tubo curto de 75mm de diâmetro nominal em 4 diferentes concentrações iniciais ( $C_0$ ).....	51
Tabela 7. Posição dos pontos de amostragem (m) em que a média das cinco maiores eficiências ( $E^*(\%)$ ) foi obtida para cada hidrograma identificado pelo tempo de base ( $t_B$ ) e concentrações iniciais ( $C_0$ ) ao canal gramado.....	53
Tabela 8. Posição dos pontos de amostragem (m) em que a média das cinco maiores eficiências ( $E^*(\%)$ ) foi obtida para cada hidrograma, considerando todas as concentrações iniciais (mg/L) ao canal gramado.....	54
Tabela 9. Evolução da lâmina (cm) com a posição dos pontos de amostragem das alturas de lâmina (m) em diferentes tempos (min), contados a partir do início do descarregamento do reservatório de $5\text{m}^3$ , responsável pelo $t_B$ de 15 minutos. $t_B/t_T$ de 1,4. ....	56
Tabela 10. Evolução da lâmina (cm) com a posição dos pontos de amostragem das alturas de lâmina (m) em diferentes tempos (min), contados a partir do início do descarregamento do reservatório de $7\text{m}^3$ , responsável pelo $t_B$ de 25 minutos. $t_B/t_T$ de 2,4. ....	56
Tabela 11. Evolução da lâmina (cm) com a posição dos pontos de amostragem das alturas de lâmina (m) em diferentes tempos (min), contados a partir do início do descarregamento do reservatório de $10\text{m}^3$ , responsável pelo $t_B$ de 35 minutos. $t_B/t_T$ de 3,3. ....	57
Tabela 12. Parâmetros obtidos por meio do ajuste não linear da Equação 3 aos dados experimentais para diferentes valores de concentração inicial ( $C_0$ ) no canal gramado, e erro médio relativo em modulo (E), para ensaio com a vazão de entrada de $10,0\text{L/s}$ , $q$ de $0,20\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{s})$ e $t_B$ de 15 min. $t_B/t_T$ de 1,4.....	62
Tabela 13. Parâmetros obtidos por meio do ajuste não linear da Equação 3 aos dados experimentais para diferentes valores de concentração inicial ( $C_0$ ) no canal gramado, e erro médio relativo em modulo (E), para ensaio com a vazão média de entrada de $12,2\text{L/s}$ , $q$ de $0,20\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{s})$ e $t_B$ de 25 min. $t_B/t_T$ de 2,4....	62
Tabela 14. Parâmetros obtidos por meio do ajuste não linear da Equação 3 aos dados experimentais para diferentes valores de concentração inicial ( $C_0$ ) no	

canal gramado e erro médio relativo em modulo (E), para ensaio com a vazão média de entrada de 9,2L/s,  $q$  de 0,14m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.s) e  $t_B$  de 35 min.  $t_B/t_T$  de 3,3.....62

Tabela 15. Turbidez residual remanescente medida e calculada (UNT) para  $C_o$  de 65mg/L nos últimos 20m do canal gramado, nas posições 80; 90 e 100m. ....63

Tabela 16. Turbidez residual remanescente medida e calculada (UNT) para  $C_o$  de 195mg/L nos últimos 20m do canal gramado, nas posições 80; 90 e 100m. ....64

Tabela 17. Turbidez residual remanescente medida e calculada (UNT) para  $C_o$  de 327mg/L nos últimos 20m do canal gramado, nas posições 80; 90 e 100m. ....64

## **Lista de Siglas**

APHA	American Public Health Association
BMP	Best Management Practices
CASQA	California Stormwater Quality Association
EPA	Environmental Protection Agency
ERDC	Engineer Research and Development Center
LID	Low Impact Development
SUDS	Sustainable Urban Drainage System
UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez
WSUD	Water Sensitive Urban Design

# 1. INTRODUÇÃO

A água sempre esteve presente no desenvolvimento e na construção do espaço tendo papel fundamental para a sociedade e suas atividades. Desta forma, sempre houve uma profunda ligação das cidades com os cursos d'água, sendo estes determinantes para a fixação da população próxima de regiões de rios, córregos e fontes de água.

Em contrapartida, a população fixada próxima aos corpos hídricos estava sujeita a enchentes sazonais, típico de regiões próximo as margens de rios. Este processo natural se agravou com o aumento da urbanização devido à redução do tempo de concentração das águas para as regiões mais baixas. De acordo com Matos (2003), até a Idade Média, as obras de drenagem não foram consideradas, em regra, como infraestruturas necessárias e condicionantes ao desenvolvimento e ordenamento de núcleos urbanos. Em decorrência desta falta de cuidados, resultou em disseminações de doenças ligadas à insalubridade das águas e pelas más condições de higiene presentes nas ruas e nas casas, juntamente com as aglomerações populacionais que pioravam as condições de saúde e saneamento.

Anos mais tarde se descobriu a ligação destas doenças com a água, surgindo o conceito de drenagem higienista, ou drenagem “convencional”. De acordo com Baptista, Barraud e Nascimento (2005), este conceito recomendava a rápida evacuação das áreas urbanas, por meio de condutos, preferencialmente subterrâneos, funcionando por gravidade. Estas medidas serviram para melhor circulação nas vias urbanas, reduzindo o contato da população com as águas residuais e evitando, também, doenças de veiculação hídrica. Sendo assim, de acordo com Poletto (2011), a drenagem pluvial não evoluiu em decorrência da modernização de práticas de engenharia em busca do conforto, mas sim de uma recomendação de profilaxia médica.

Assim, no Brasil, o processo de drenagem ocorreu pelos mesmos motivos que ocorreram na Europa, sendo uma medida de preservar a saúde pública da população. Desta maneira, foram instalados nas primeiras drenagens urbanas brasileiras o

conceito higienista, sendo que inicialmente, segundo Silveira *apud* Poletto (2011), era um sistema sanitário unitário até o início do século XX, quando começou a prevalecer o sistema separador absoluto, em que a drenagem pluvial é feita independentemente da rede de saneamento.

Este tipo de sistema de drenagem em que visa apenas o escoamento rápido das águas pluviais para as regiões mais baixas ainda é uma prática nos dias atuais. De acordo com Tucci (2005), no Brasil ainda persiste a mentalidade de controlar as cheias urbanas devido à urbanização através da canalização dos trechos críticos. Juntamente com a intensa urbanização, este conceito causa problemas como inundação, baixa qualidade de água e a falta de um pré-tratamento destas antes de despejo em rios e córregos.

De acordo com Carneiro e Miguez (2001) com o passar do tempo à quantidade de água gerada pelas cidades passa a ser apenas um dos problemas para a drenagem, tendo em vista que a qualidade destas passa a assumir uma questão considerável.

Com base numa nova abordagem de drenagem urbana que é contrária ao conceito higienista, este trabalho visa estudar de um novo conceito que soluciona problemas decorrentes de tais técnicas higienistas. Este novo conceito de drenagem é provinda de conceitos internacionais, de países como França, Inglaterra, Austrália, Estados Unidos. Estes países trabalham o manejo das águas por meio de um gerenciamento e aprovação de controle dos projetos, visando sua qualidade e quantidade (MARYLAND, 2000).

Baseando-se em técnicas americanas, chamadas de *Best Management Practices*, traduzido para o português como “técnicas compensatórias”, que para Stagge (2006), tem o foco no estudo no tratamento do escoamento superficial de chuvas influenciando em um método alternativo de tratamento de água de chuva, que depende do uso de processos naturais e adaptação do projeto para tratamento das águas no local de aplicação.

Nesse sentido, existe ainda uma necessidade de verificar se estas técnicas se adaptam para a realidade brasileira e também de buscar, dentro destas técnicas, sua melhor aceitação nos futuros projetos e trabalhos. Alguns pesquisadores abordam este novo conceito de drenagem, como Carvalho e Braga (2003), que abordam que a lógica de hoje é reter as águas pluviais, o máximo possível, inclusive em propriedades individuais, através de várias medidas nas áreas urbanas das bacias hidrográficas, tais como uma taxa de ocupação menor nos lotes urbanos individuais, calçadas permeáveis, pavimentação com maior rugosidade, entre outros.

O *Low Impact Development* (LID) foca aproximar o retardamento do escoamento dentro do local e usando processos baseados nas técnicas compensatórias como infiltração, evapotranspiração, e direcionar o escoamento para áreas permeáveis para tratar do escoamento imediatamente. (Stagge, 2006)

Neste contexto, o presente trabalho estudou umas destas técnicas compensatórias, o canal gramado. Suas características são de canais rasos que podem ser usados para coletar e/ou conduzir as águas e também remover poluentes. Os canais podem ser cobertos por gramas ou outra vegetação e tem taludes rasos nas suas laterais e um fundo plano que significa que a maior parte do tempo à água escoar em lâminas baixas através da grama ou vegetação Figura 1. (SUDS)

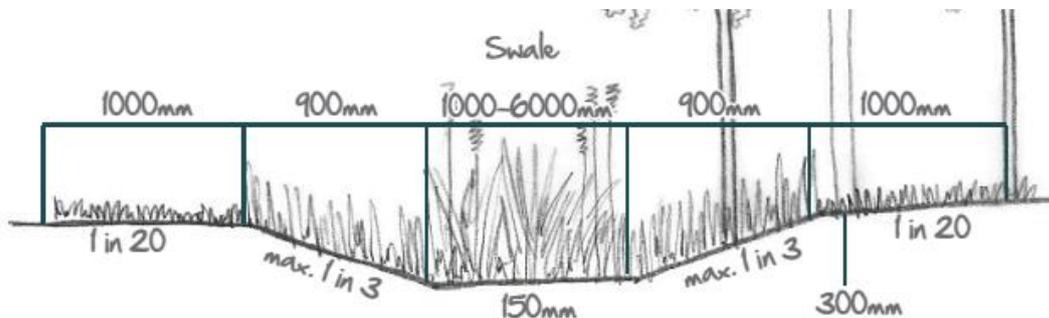
Os canais gramados são simples e eficientes na gestão do escoamento superficial de águas. A grama ou outras vegetações reduzem a velocidade das águas e, também, retém uma parte, permitindo a infiltração para o solo. Ademais, as plantas ajudam evaporar parte da água e filtrar a poluição presente nas águas. (SUDS).



**Figura 1. Canal gramado em área residencial, Malmo, Suécia.**

**Fonte: SUDS**

Pouca informação consistente sobre melhorias na qualidade de água para canais gramados está disponível, em grande parte por causa da complexidade de operação dos canais. Os canais gramados recebem o escoamento lateralmente através de lados inclinados vegetados (Figura 2), que podem aumentar o melhoramento da qualidade da água. Infiltração através da área de superfície pode reduzir o volume de escoamento e melhorar a qualidade. No entanto, inúmeros pontos de entrada e saída podem complicar na análise do desempenho do canal. (Stagge, 2006)



**Figura 2. Perfil de um canal gramado com utilização de árvores em um de seus lados.**

**Fonte: SUDS**

Assim, o trabalho se desenvolveu através da pesquisa focada no canal gramado e na sua remoção de sedimentos ao receber um escoamento superficial. O canal gramado estudado para a pesquisa está localizado dentro do *campus* da Universidade Federal de São Carlos, na cidade de São Carlos – SP (Figura 3).



**Figura 3. Canal gramado dentro do *campus* São Carlos – UFSCar.**

**Fonte: Autor**

Este estudo analisou a remoção ao longo do seu canal, verificando o grau de eficiência para concentrações de sedimentos diferentes e vazões de água simulada diferentes de entrada. A entrada da vazão ocorreu numa das pontas do canal gramado, como mostra a Figura 4.



**Figura 4. Entrada da água utilizada para simulação de escoamento superficial no canal.**

**Fonte: Autor**

Na segunda etapa do trabalho, utilizando os valores obtidos pela remoção de sedimentos ao longo do canal, modelou-se estes valores para a equação de decaimento de primeira ordem, a mesma utilizada no trabalho de Wong *et al* (2005). Os valores medidos em campo auxiliaram a aferir dois parâmetros ( $kd$  e  $C^*$ ) utilizados na modelagem, traduzindo o processo ocorrido no canal na sua remoção de sedimentos.

Por fim, o objetivo do trabalho foi analisar a remoção de material particulado para um canal gramado construído em escala real. A análise da remoção consistira no estudo da correlação entre a lâmina do escoamento superficial, comprimento do canal gramado e o desempenho de remoção; e a modelagem da remoção de material particulado.

## **2. BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL**

O tema principal da pesquisa está relacionado à qualidade das águas pluviais e seu tratamento através do canal gramado. Assim a revisão tem como tema as técnicas compensatórias, sendo que, primeiramente, aborda a sua evolução e a visão global delas. Em seguida, aprofunda na questão das técnicas compensatórias e sua

ligação quanto a qualidade das águas pluviais, mostrando a importância destas como a primeira forma de remoção de poluentes.

## **2.1 NOVA CONCEPÇÃO DE SISTEMA DE DRENAGEM URBANA**

Através da breve introdução, deste trabalho, é possível entender a mudança de concepção em relação ao sistema de drenagem urbana ao longo dos anos. As técnicas anteriores, de acordo com Tucci (2005), possuíam a mentalidade de controlar as cheias urbanas devido à urbanização através da canalização dos trechos críticos. Tal mudança que trouxe uma visão holística para a drenagem passando a serem considerados outros fatores, não somente o rápido escoamento das águas pluviais.

A mudança de concepção tenta solucionar questões trazidas da forma de urbanização ocorridas no passado. Tais problemas abrangem um contexto amplo, que para Ferreira (2000), as metrópoles sentem os efeitos da modernidade, como perda de biodiversidade, extinção de espécies, degradação ambiental e perda da qualidade de vida. Sua visão mostra que as cidades necessitam de um desenvolvimento sustentável que passa a ser uma premissa de que a ética e a formação cultural influem na conformação ambiental, modificando as relações sócias espaciais.

Essa concepção de drenagem urbana surge por volta dos anos 90, com uma nova abordagem de gestão sustentável de drenagem conhecida como Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development – LID), no qual, busca compatibilizar o layout das estruturas, atendendo a paisagem e satisfazer as exigências estéticas como uma característica das águas urbanas. Para isso ocorrer é necessário que se mantenha a eficácia no tratamento das águas pluviais, e o não comprometimento no comportamento hidrodinâmico do sistema (PERSSON, et al., 1999).

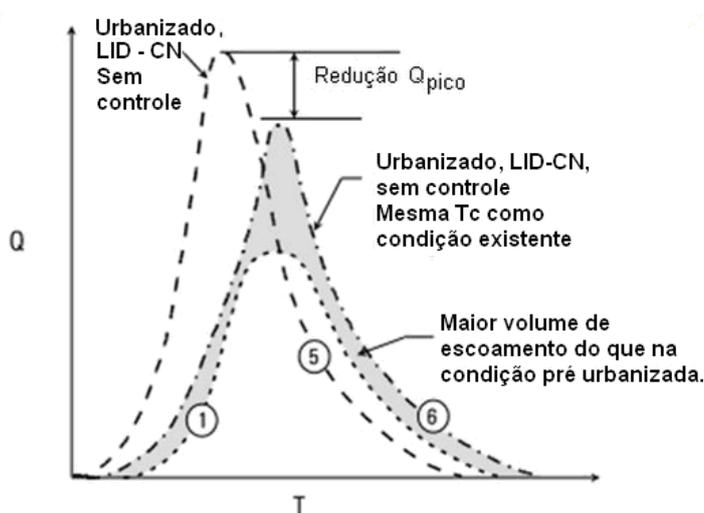
Nos Estados Unidos e no Canadá, esse tipo de sistema é chamado de *Low-Impact Development* (LID), ou Desenvolvimento de Baixo Impacto. Segundo Souza (2005), este sistema procura aproximar mais ainda a drenagem urbana do sistema natural, incentivando práticas de reuso e infiltração. As técnicas utilizadas apresen-

tam bons resultados financeiramente e ambientalmente para novos empreendimentos.

Na Austrália, existe o *Water Sensitive Urban Design (WSUD)*, ou Projeto Urbano Hidricamente Inteligente. De acordo com Souza (2005), os australianos buscam tornar o caminho percorrido da água o mais próximo possível da percepção da sociedade em contraposição à utilização de condutos e sarjetas, incentivando emprego de técnicas que imitem o fluxo natural.

Na Inglaterra, foi criado o *Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)*, ou Sistemas de Drenagem Urbanas Sustentáveis. De acordo com Poletto (2011), este sistema é desenvolvido e estudado em conjunto com universidades e empresas que subsidiam estas pesquisas. Esse sistema, também conta com o apoio do *Applied Research Group in Sustainable Drainage*, que desenvolve aspectos interdisciplinares de drenagem sustentável.

Os resultados obtidos pelo uso do Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID), nos Estados Unidos, podem ser vistos na Figura 5 cujo pico de cheia é reduzido através do uso das técnicas compensatórias, gerando tempo de concentração igual às condições da pré-ocupação.



**Figura 5. Gráfico do pico de cheia sem controle com LID (1), pico de cheia com LID e mesmo tempo de concentração na pré-urbanização (6), pico de cheia na do condição de pré-ocupação.**

**Fonte: Maryland (2000)**

Todos estes sistemas citados possuem em comum a visão de uma drenagem sustentável, de forma que alteração das bacias hidrográficas urbanas seja a menos sentida e revertida para sua formação de pré-ocupação. Para isso, técnicas estruturais são utilizadas para que possa ser alcançado o controle das águas pluviais, de forma qualitativa e quantitativa, como serão vistas no próximo tópico.

### **2.1.1 SISTEMAS SUSTENTAVEIS DE DRENAGEM E TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS**

As técnicas compensatórias, ou *Best Management Practices* (BMP), de acordo com Baptista, Barraud e Nascimento (2005), são tecnologias alternativas para soluções clássicas, que consideram os impactos da urbanização de forma global, tomando a bacia hidrografia como base de estudo, buscando procedimentos que retardem os escoamentos, a racionalização da ocupação do solo urbano, a não conexão direta com as áreas impermeáveis, etc.

As técnicas alternativas que as compõe são, de acordo com (AGOSTINHO; POLETO, 2011, BAPTISTA; BARRAUD; NASCIMENTO, 2011), pavimento permeáveis e semipermeáveis; reservatórios (bacias) de detenção ou retenção; trincheira de infiltração; canal de infiltração (Figura 6); poço de infiltração; micro reservatório; telhado verde, bacia subterrânea; faixas gramadas.

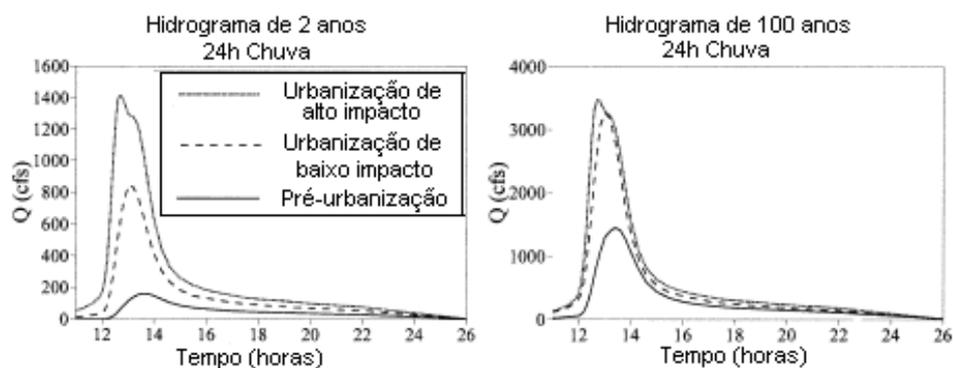


**Figura 6. Canal gramado, localizado na microbacia de pesquisa do grupo G-hidro, situado na região norte da UFSCar, *campus* São Carlos.**  
**Fonte: Autor**

Estes sistemas podem trabalhar de forma individual ou em conjunto, de acordo com as necessidades locais e ambientais, o custo-benefício e aceitação social. (MARYLAND, 2000).

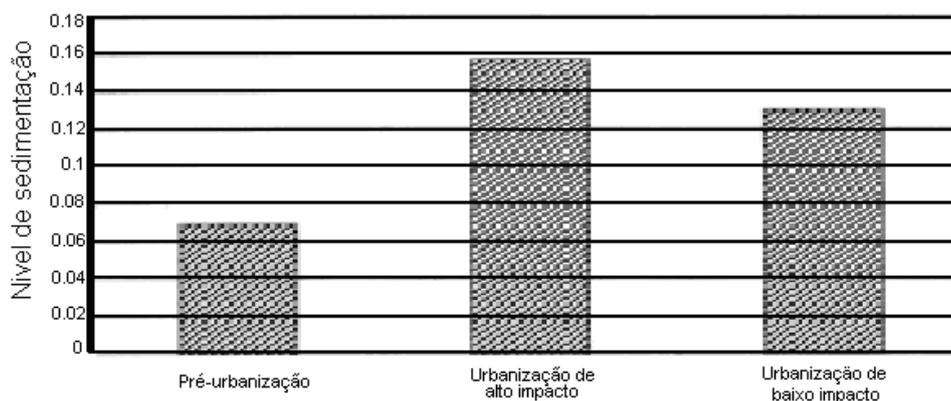
Estas técnicas têm como base utilizar processos naturais para o controle qualitativo e quantitativo da água pluvial, levando em consideração o tipo de uso e ocupação do solo e suas características, a hidrologia e a qualidade da água escoada superficialmente. Assim, as técnicas compensatórias usadas se baseiam em três conceitos: retenção, detenção e infiltração. (WAHL, 2009).

Assim, um dos processos utilizados por estas técnicas é a infiltração. No trabalho de Holman-Dodds, Bradley e Potter (2003), mostram através de três cenários, pré-ocupação; ocupação convencional e ocupação com LID, a redução do escoamento superficial através da infiltração, mostrando uma grande eficiência para chuvas de baixa intensidade, reduzindo o pico de chuva (Figura 7), além de trazer benefícios quanto à redução da carga de sedimentos (Figura 8).



**Figura 7. Hidrograma para de chuvas de tempo de retorno de 2 anos (esquerda) e pico de cheia de tempo de retorno de 100 anos (direita), mostrando a diferença entre área urbanizada, área com uso de LID e área de pré-ocupação.**

**Fonte: Holman-Dodds, Bradley e Potter (2003)**



**Figura 8. Nível de sedimentação apresentado para área pré-urbanizada, área urbanização de alto impacto e urbanização com LID.**

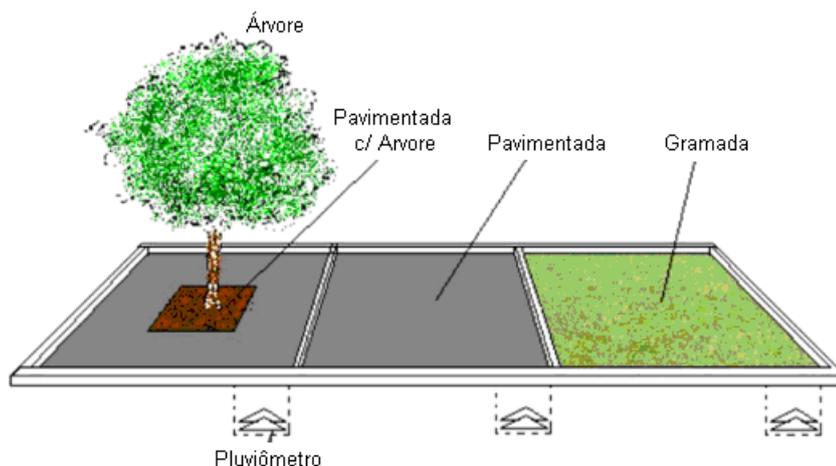
**Fonte: Holman-Dodds, Bradley e Potter (2003)**

Outro trabalho semelhante que visa analisar a influência na redução do escoamento superficial é o de Tavanti e Barbassa (2012), onde é estudado a microbacia da Universidade Federal de São Carlos através de três tipos cenários, o de pré-desenvolvimento; desenvolvimento convencional existente e o desenvolvimento de baixo impacto (LID). Com a implantação do LID na microbacia, houve uma criação de 25% de áreas de cobertura vegetal; reduzindo em 17% as áreas impermeáveis como vias, estacionamentos e passeios. Estas implementações, em termos hidrológicos, reduziram em 21% a vazão de pico e 26,9% do volume em comparação com a ocupação convencional existente.

Em contrapartida, as técnicas compensatórias podem ter alteração na sua eficiência dependendo do tipo de evento de chuva, pois para cada técnica se adapta melhor para pequenos eventos outros para grandes eventos de chuva, variando também a área de influência para tal. Esta análise foi verificada no trabalho de Qin, Li e Fu (2013), a qual verificou que o telhado verde e o pavimento permeável trazem uma redução maior das cheias para intensidades de chuvas menores, enquanto as áreas gramadas trazem uma redução de escoamento menor, mas melhor para chuvas mais intensas.

Técnicas compensatórias utilizando vegetação, como é o caso do trabalho realizado por Mckergon *et al.*(2003) mostrou que a vegetação ripária contribui para melhorar a qualidade da água, a remoção de sedimentos em suspensão de diversas formas de nitrogênio, fósforo e potássio, por processos químicos, físicos e biológicos, protegendo os rios de fatores poluentes por filtragem (OSBORNE; KOVACIC, 1993).

O sistema de drenagem sustentável se mostra eficiente até mesmo com a utilização de árvores em áreas urbanas para a redução de escoamento superficial. No trabalho de Armson, Stringer e Ennos (2013), é analisado três tipos de superfícies urbanas, a pavimentada; a gramada e a pavimentada com uma árvore plantada com uma pequena área não pavimentada em seu entorno, como na Figura 9, todas as áreas com 9 m<sup>2</sup>. Os resultados mostraram que o escoamento superficial da área com a árvore plantada possui uma redução de escoamento de 58% no inverno e 62% no verão se comparados com a área totalmente asfaltada. Em relação a área verde, a redução se mostra praticamente total, com um escoamento superficial menor que 1% se comparado com a área asfaltada.



**Figura 9. Imagem demonstrando as áreas de estudo para diferentes coberturas superficiais, área pavimentada com árvore; pavimentada; e gramada, analisando a redução do escoamento superficial.**

**Fonte: Armson, Stringer e Ennos (2013)**

## **2.2 REMOÇÃO DE SEDIMENTOS POR VEGETAÇÃO (GRAMA)**

A abordagem sobre as técnicas compensatórias mostra sua funcionalidade e seus benefícios perante sua utilização. Neste contexto, uma das formas de tratamento para as águas pluviais são a utilização de gramas e outros tipos de vegetação para tal funcionalidade. Estas desempenham papel fundamental, pois além de trazer benefícios qualitativos, trazem, também, valorizam a paisagem das áreas urbanas o que acarreta a um melhor bem estar nestes locais.

O processo de remoção de sedimentos e poluentes através da utilização de plantas, de acordo com ERDC (2002), ocorre através da utilização de vegetação e os restos de detritos vegetais que contribuem na redução dos sólidos suspensos e a concentração de metal total, mas tem pouco efeito sobre concentrações solúveis de metais, sendo que para a remoção destes é necessário que o pH do solo se apresente neutro ou valores superiores.

A utilização da vegetação para melhoria da qualidade da água é uma forma simples para alcançar tal objetivo. Em literaturas estrangeiras, muito é estudado sobre as Vegetative Filter Strips (VFS), ou faixas vegetadas filtradoras, que são técnicas compensatórias que podem ser instaladas em diversas áreas para controle da movimentação dos sedimentos nos corpos hídricos, sendo que as águas de chuva passam através destes filtradores gramados como laminas e água. Por consequên-

cia, evita-se um possível assoreamento em córregos, rios, lagos, etc. (HELMERS *et al.*, 2005, DANIELS; GILLIAM, 1996).

Seu funcionamento se baseia, de acordo com Hunt *et al* (2010), em espalhar o escoamento superficial ao longo da faixa gramada de forma que a maior parte desta água passe pela grama ou vegetação, e podendo infiltrar parcela desta água. Por consequência pode-se reduzir a fonte de poluição sem ponto específico das áreas agrícolas (DANIELS; GILLIAM, 1996; HELMERS *et al.*, 2005, GHARABAGHI *et al.*, 2000).

Devido à redução de carga poluidora, originalmente, esta técnica era usada como prática de tratamento em agriculturas (EUA) sendo que, recentemente, foi implementada para práticas urbanas. (CASQA, 2003, DILLAHA; SHERRAD; LEE, 1986).

Estas técnicas podem ser usadas na maior parte de regiões, porém devido à necessidade de grandes espaços, isso acaba restringindo a sua implantação. Esta técnica é mais bem implantada para tratamento em regiões próximas a estradas e rodovias; estacionamentos; pontos que deságuem de telhado e áreas permeáveis. Na Figura 10, um exemplo de uma faixa gramada filtradora construída em escala real no *campus* São Carlos, da Universidade Federal de São Carlos.



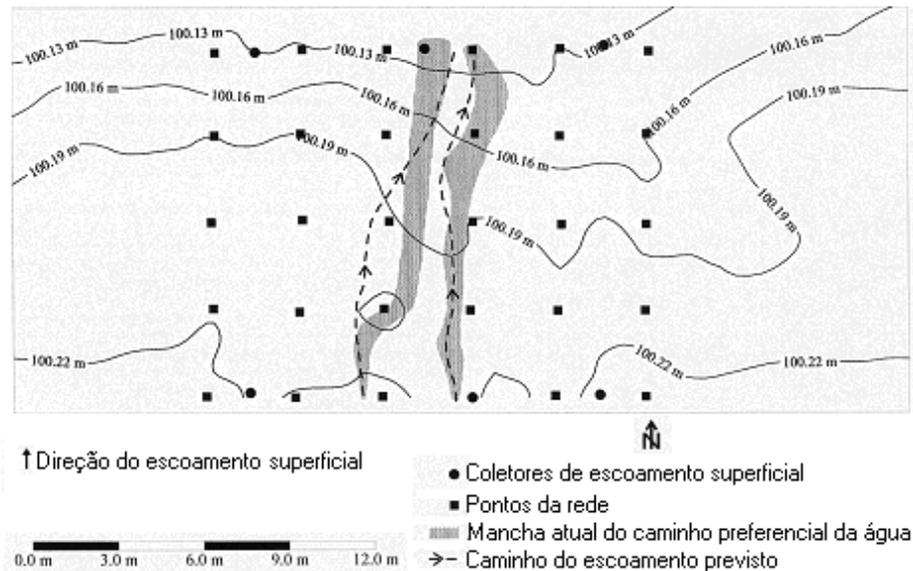
**Figura 10. Plano de infiltração localizado do entorno de estacionamento (5000 m<sup>2</sup>) e departamento de Medicina II e Gerontologia, localizado na Microbacia experimental do grupo de pesquisa GHIDRO – UFSCar, *campus* São Carlos.**  
Fonte: Autor

Os fatores importantes que influenciam no seu tratamento são à entrada de carga de sedimentos e nutrientes no sistema; a taxa de escoamento superficial ao por unidade de comprimento; densidade e altura da vegetação; e a declividade e largura do filtro (DILLAHA; SHERRAD; LEE, 1986). Outra característica importante é que a forma de remoção de partículas é feita através da filtração realizada pela vegetação, que pode ser usada para os nutrientes contidos para benefício próprio, e a infiltração, onde os poluentes são removidos pela filtração dos espaços vazios dentro do solo.

Por trabalhos pretéritos, a eficiência em remoção de poluentes obtidas pelas faixas gramadas pode chegar a valores significativos, variando o valor da remoção de acordo com as características locais e das dimensões da técnica.

A redução da carga de poluentes, em literaturas estrangeiras, pode ser 50 a 80%, com remoção de 80 % de SST (Daniels e Gilliam, 1996); remoção de 51% (Wiston *et al.*, 2011); reduções de massa e concentrações de média de 99,7% e 97,9% para SST, 91,8% e 42,9% para total de P, e 92,1% e 44,4% para total de N de remoção (Mankin *et al.*, 2007); remoção de SST de 50 a 98% (Gharabaghi *et al.*, 2000).

Uma questão apontada por alguns pesquisadores que interferem sobre a questão da eficiência remoção de sedimentos são os caminhos preferenciais feitos pelas águas pluviais quando escoadas superficialmente. Sobre essa questão, a pesquisa em escala real feita por Helmers, Eisanhauer e Dosskey (2005) obteve uma redução de 80% de cargas de sedimentos, com uma entrada de carga de sedimentos de 73.631g/m e saída de 14.982 g/m. No seu trabalho foram levantadas as áreas de caminho preferencial do escoamento superficial representado em mancha na Figura 11, e o caminho previsto em pontilhado, sendo indiferente para a eficiência na remoção de sedimentos.



**Figura 11. Caminhos preferenciais de escoamento superficial para estudo de faixa de grama.**

**Fonte: Helmers, Eisanhauer e Dosskey (2005) (Modificado)**

Assim, as faixas gramadas atuam como primeira forma de tratamento de águas pluviais, necessitando de outras técnicas em conjunto para a melhoria de qualidade. De acordo com SUDS, estes atuam em conjunto com os canais gramados, sendo que estes recebem a água proveniente das faixas gramadas.

Os canais gramados são rasos, linhas de gramadas, tipicamente com o fundo plano que são originalmente projetados para transportar a água de chuva Figura 12. (Barrett, 1998).



**Figura 12. Canal gramado localizado paralelo a extensão de rodovia, localizado em Oxford.**

**Fonte: SUDS**

Assim como as faixas gramadas, são usadas para projetos de vias e rodovias porque eles apresentam-se melhor esteticamente para o transporte de escoamento superficial, mais recentemente descobriu-se a melhoria da qualidade da água que pode ser realizado através dos canais pela sedimentação, filtrando pelas gramas, infiltração, e provavelmente, algum processo biológico. Enquanto que estudos recentes tem revelado o bom desempenho, os mecanismos de compreensão dos parâmetros de projetos não são amplamente disponíveis. (Stagge, 2006)

Porém, esta técnica possui pouco estudo sobre os parâmetros qualitativos obtidos com a sua utilização, pois a entrada de escoamento de água provém ao longo do canal pelas suas laterais. Assim os poluentes não possuem uma fonte única de poluentes e nem um ponto único de entrada, o que dificulta a análise qualitativa da água.

Assim, de acordo Deletic (2005), a grama é muito eficaz para o controle de sedimentos, mas é menos eficiente na remoção de outros poluentes, quando usadas partículas finas de granulometria 5,8  $\mu\text{m}$ , sendo que para uma melhor eficiência, a extensão da grama e o tamanho das partículas e a concentração são fundamentais para a remoção.

Algumas pesquisas anteriores mostram a que a remoção de sedimentos mostra com valores de eficiências diferentes. Assim, trabalhos em relação a canais gramados tendem a ser muito eficientes na remoção de SST, com valores de remoção de EMC reportados como: 85-87% (Barrett et al 1998), 50-70% (Felipe, 2014), 41-52% de SST (Stagge, 2006). Este alcance de eficiências de remoção é provavelmente causado pelas diferenças de chuva e características dos canais gramados.

No entanto, existem estudos que tenta modelar e descrever os mecanismos da remoção de sedimentos. Trabalhos como de Deletic e Fletcher (2006) e Wong *et al* (2005) que buscam modelar a remoção de poluentes, que serão descritos no tópico seguinte.

# 3. METODOLOGIA

A metodologia apresenta a descrição da localização, dimensões e características do canal gramado; os materiais e a forma de coleta de dados em campo; a análise dos dados experimentais; modelo matemático usando como base os dados experimentais.

## 3.1 PRIMEIRA ETAPA: PREPARATIVOS PARA O ENSAIO DE REMOÇÃO DE SEDIMENTOS NO CANAL

### 3.1.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A técnica compensatória em estudo é o canal gramado que está localizado na Universidade Federal de São Carlos, *campus* São Carlos, na posição 21°58'41,77"S, 47°52'46,44"O (Figura 13).



Figura 13. Demarcação da área da microbacia de estudo (em vermelho, à esquerda), área do objeto de estudo inserido dentro do *campus* (à direita).

Fonte: Google Earth adaptado

O canal gramado se localiza na região norte da universidade, inserido dentro da microbacia experimental utilizado para pesquisas referentes ao grupo de pesquisas G-Hidro.

### **3.1.2 DIMENSÕES E CARACTERÍSTICAS DO CANAL GRAMADO**

O canal gramado foi construído em escala real, servindo de ligação entre duas técnicas compensatórias, ambos sendo planos de infiltração localizados nas extremidades do seu canal (Figura 14). Além disso, o canal recebe as águas pluviais do prédio, ainda em construção, da Medicina e Gerontologia, e tem a possibilidade, também, de receber as águas pluviais do plano de infiltração à sua jusante (Figura 15).



**Figura 14. Tubulação de saída do plano de infiltração no início do canal gramado.**  
Fonte: Autor



**Figura 15. Ligação da drenagem predial da Medicina com o canal gramado.**

**Fonte: Autor**

As características físicas estão descritas na

Tabela 1, descrevendo os valores de suas dimensões. O perfil ao longo do canal está representado nas Figura 16 e Figura 17.

**Tabela 1. Dimensão do canal gramado.**

Dimensão Física do Canal Gramado	Inclinação (%)	2
	Comprimento do canal gramado (m)	100
	Largura de Fundo (m)	0,7
	Largura Superior (m)	1,30
	m (m)	0,3
	h(m)	0,15



**Figura 16. Perfil do canal gramado, dimensão em metros (sem escalas).**

**Fonte: G-Hidro (2013), adaptado.**



**Figura 17. Perfil do canal gramado em campo.**  
**Fonte: Autor**

### **3.1.3 CARACTERÍSTICAS DO SOLO LOCAL**

De acordo com a pedologia local, caracterizado por Lorandi, Takemoto e Torresan (2001), o solo possui a características de latossolo vermelho-amarelo. Por ser um solo laterítico, ocorre na superfície de seu solo a formação de uma crosta, sendo necessário que exista a presença de camada de vegetação para evitar o processo de laterização, melhorando a permeabilidade do solo.

A composição dos sedimentos quanto ao solo local foi estudado por Lucas (2011), Gutierrez *et al.* (2009), e Sobrinha (2012), que realizaram os ensaios de granulometria no *campus* da UFSCar, nas áreas próximas ao canal gramado, cujo granulometria do solo se apresenta como Areia Média Argilosa.

Na Tabela 2, a classificação do solo se estabelece como um solo com, aproximadamente, 70% de material arenoso e 30% de material composto por silte e argila.

**Tabela 2. Classificação do solo proveniente do local construído o canal gramado.**

Profundidade	% Argila	% Silte	% Areia Fina	% Areia Média	% Areia Grossa	% Pedregulho	Classificação do Solo
Superficial	27	5	18	44	6	0	Areia Média a Fina argilosa
30 cm	28	4	18	48	2	0	Areia Média a Fina argilosa

Fonte: Felipe (2014)

### **3.1.4 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL COM SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS**

#### **3.1.4.1 Material particulado e concentrações iniciais utilizadas**

Esta etapa consistiu na obtenção do material particulado que foi usado para os ensaios a fim de analisar a remoção ao longo do canal. Para tal, utilizou-se o próprio solo local como material deste estudo, representando sedimentos suspensos transportados pelo escoamento superficial simulado. A razão de tal escolha se deve pela maior representatividade deste como forma de poluente e maior proporção no *campus*, além disso, trabalhos pretéritos apontam melhores dados representativos em análise de remoção de poluentes.

Baseando-se no trabalho realizado por Felipe (2014), o tamanho de sedimentos utilizados para o trabalho foi de partículas menores de 75  $\mu\text{m}$ . Na literatura, se encontra que para os tamanhos de sedimentos de poluição urbana estão abaixo de 100  $\mu\text{m}$ , de acordo com Egodowatta e Goonetilleke (2006).

Em contrapartida para o trabalho de Laurenti *apud* Poletto (2008), foi observada uma porcentagem de sedimentos menores que 63  $\mu\text{m}$  para áreas urbanas de 9 a 28%, e maiores para áreas urbanas em conjunto com mangue e áreas industriais, entre 38 a 81% de sedimentos.

Dentro deste contexto, os valores utilizados por Felipe (2014) se encontram em valores aceitáveis, para uma situação de área urbana, justificando tal fração granulométrica utilizada.

Para a obtenção do material particulado, foi necessário o peneiramento do solo do *campus*, realizado através de um peneirador mecânico, cujo material passa por peneiras de diferentes malhas até ser peneirado na malha 200, que representa sedimentos menores que 75 $\mu$ m.

Para os ensaios, as concentrações de material particulado utilizadas para a pesquisa foram baseadas no trabalho realizado por Felipe (2014), assim a variação de concentração usada foram de 65mg.L<sup>-1</sup>, 130mg.L<sup>-1</sup>, 195mg.L<sup>-1</sup>, 262mg.L<sup>-1</sup>, 327mg.L<sup>-1</sup> e 400mg.L<sup>-1</sup>, utilizadas para cada vazão de entrada realizada.

#### 3.1.4.2 Simulação do escoamento superficial

Para os ensaios em campo, foi necessário utilizar sistemas de reservatório para que pudesse ser possível a simulação de escoamento superficial com material particulado em campo.

Assim, para tal, o trabalho se baseou no sistema utilizado por Felipe (2014), utilizando um reservatório de 5m<sup>3</sup> para realizar as simulações (Figura 18).



**Figura 18. Reservatório de 5m<sup>3</sup> utilizado para descarregamento no canal.**  
Fonte: Autor

Para cada ensaio com reservatório utilizado, foi obtido seu hidrograma em função de uma altura de lâmina determinada para que a replicação dos ensaios pudesse garantir uma mesma vazão de entrada no canal. Para isso, foi monitorado o descarregamento do reservatório por tempo e pela alteração do nível interno de água, medido através do equipamento OTT Orpheus Mini.

Assim, para o reservatório de volume de  $5\text{m}^3$ , obtido por Felipe (2014), utilizou-se para o experimento uma tubulação de 75mm de diâmetro, conectado a um registro esfera e um cotovelo de  $90^\circ$ . Para a padronização do descarregamento de um mesmo volume, definiu-se uma altura do nível da lâmina de água de 1,34m.

Esta metodologia foi repetida para os demais ensaios, as quais consistiram na utilização de reservatórios de diferentes volumes para a obtenção da variação da vazão de entrada.

Para tal, utilizou-se uma combinação de reservatório de volume de  $2\text{m}^3$  com o reservatório de  $5\text{m}^3$ , contribuindo para aumento de vazão de saída em conjunto com o reservatório de 5.000 litros, assim aumentando a altura da lâmina do escoamento superficial e a vazão de entrada (Figura 19). O reservatório de  $2\text{m}^3$  possui um tubo de diâmetro de 55mm conectado a um registro esfera e com o cotovelo de  $90^\circ$  na sua extremidade.



**Figura 19. Reservatórios de 2m<sup>3</sup> e 5m<sup>3</sup> utilizados para aumento do volume de descarregamento no canal.**

**Fonte: Autor**

O mesmo processo foi realizado para um reservatório de 10m<sup>3</sup>, instalado, que possui uma tubulação de saída de 75mm de diâmetro, conectado a um registro de esfera e um cotovelo de 90 ° na sua extremidade, onde a água escoar para o canal (Figura 20).



**Figura 20. Descarregamento do reservatório no canal para volume de reservatório de 10m<sup>3</sup>.**

**Fonte: Autor**

Para cada variação do volume de descarregamento no canal, o hidrograma obtido para cada um destes casos, para o volume de 5, 7 e 10m<sup>3</sup> se apresenta conforme a Figura 21. Assim, a vazão de entrada correspondente a estes volumes foram 9,2L/s, 10L/s e 12,2L/s, respectivamente.

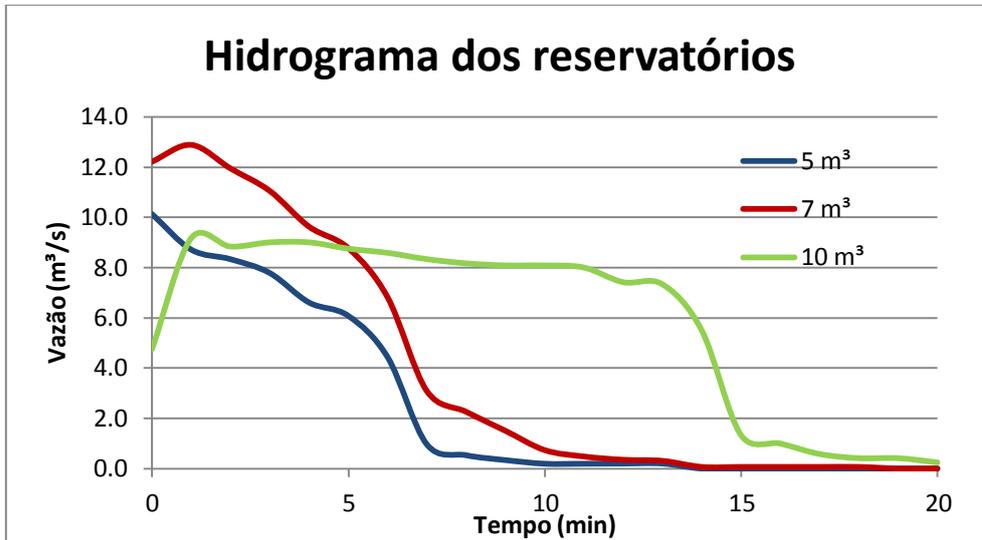


Figura 21. Hidrograma da chuva simulada por meio do descarregamento do reservatório de 10m<sup>3</sup>.

Fonte: Autor

Com os valores das vazões para cada reservatório, foram determinadas, também, as vazões específicas com base na área e altura média da lâmina do escoamento superficial percorrido no canal. Para o cálculo das vazões específicas de valor médio e máximo, foram obtidas pela seguinte equação 2:

$$q_m = \frac{Q_{max}}{L_m} \quad (2)$$

Em que:

$q_m$ : velocidade do escoamento longitudinal referente a lâmina no ponto de descarregamento do reservatório (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>)

$Q_{max}$ : valor máximo da vazão medida no hidrograma (m<sup>3</sup>/s)

$L_m$ : área trapezoidal do canal gramado, determinado por meio da lâmina de água máxima (m<sup>2</sup>)

### **3.1.5 INSTALAÇÃO DOS COLETORES DE AMOSTRAS**

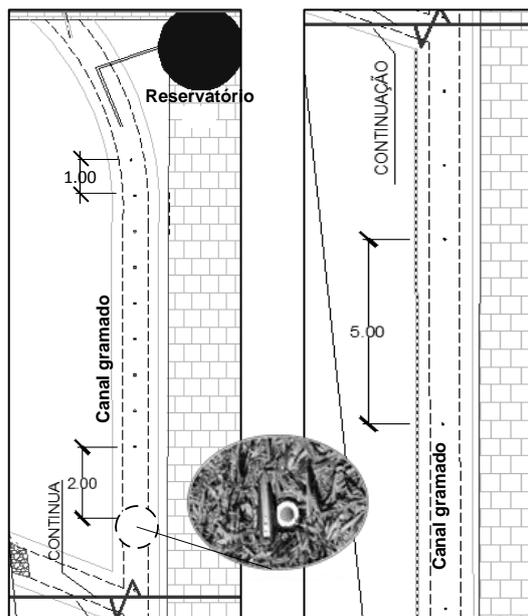
Para a análise da remoção dos sedimentos suspensos, foram utilizados coletores que serviram para o armazenamento das amostras do escoamento superficial com sedimentos suspensos ao longo do canal (Figura 22).



**Figura 22. Coletor utilizado para a coleta das amostras.**

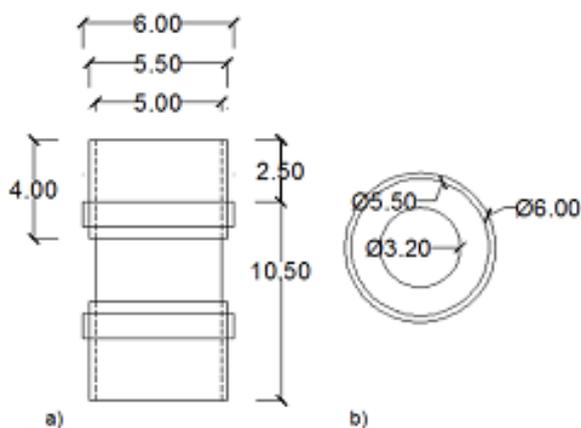
**Fonte: Autor**

Os coletores foram instalados e distribuídos ao longo da vala, sendo, no total, 26 coletores. Os coletores foram dispostos da seguinte maneira, 10 coletores espaçados em 1m; seguidos de 5 coletores espaçados em 2m; 6 coletores espaçados em 5m; e 5 coletores espaçados em 10m, dispostos da montante a jusante, respectivamente (Figura 23).



**Figura 23. Vista seccionada em planta do canal gramado com indicação do reservatório para descarregamento e dos coletores espaçados ao longo do comprimento do canal. A vista foi seccionada na posição indicada, para facilitar visualização. Em detalhe fotografia do coletor ao lado de um objeto de 12cm. Sem Escala.**  
**Fonte: Felipe (2014)**

Este coletor foi desenvolvido por Felipe (2014), sendo que seu funcionamento ocorre através do enchimento de seu recipiente e com uma pequena bola de isopor, ela cessa a entrada de água no mesmo. Suas dimensões são representadas pela (Figura 24).



**Figura 24. Perfil e dimensão dos coletores de amostra utilizados em campo.**  
**Fonte: Felipe (2014)**

Após o ensaio, as amostras foram analisadas em laboratório com o auxílio do turbidímetro, obtendo os valores em Unidade Nefelométrica de Turbidez (UNT). Com

isso, se obteve para cada ponto a turbidez das amostras, podendo-se verificar a remoção ao longo de cada ponto do canal.

### **3.1.6 COLETA DO NÍVEL DA LÂMINA DE ÁGUA AO LONGO DO CANAL**

Para análise do comportamento da passagem de onda de cheia ao longo do canal, foram realizadas medições de nível de lâmina em termos de espaço e tempo.

A análise consistiu em medições ao longo do canal, definindo os pontos experimentais a partir do ponto de entrada da vazão, sendo que estes pontos foram distanciados igualmente com uma distância de 15m. Os pontos analisados foram 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90m, sendo medidos a partir da entrada de água no canal, medindo a altura de lâmina para o intervalo de 5 min entre as medições. A medição de nível consistiu na utilização de estacas para a marcação do nível das lâminas, representado pela Figura 25.



**Figura 25. Medição da altura da lâmina de água com o auxílio de uma estaca de madeira, realizada para os pontos amostrais (0,15, 30, 45, 60, 75, 90m).**

**Fonte: Autor**

### **3.1.7 ENSAIO EM CAMPO UTILIZANDO MATERIAL PARTICULADO**

Os ensaios para a coleta de dados do material particulado removido foram feitos com a utilização do reservatório junto com a utilização de bombas hidráulicas. Estas bombas serviram para tornar homogêneos a solução de água mais o material particulado (Figura 26). As bombas eram ligadas e o material particulado despejado para dentro do reservatório, enquanto o material se homogeneizava para ser lançado ao canal gramado.



**Figura 26. Mistura da água utilizando-se bomba para homogeneizar o material particulado.**

**Fonte: Autor**

Antes de cada ensaio, foi feita uma lavagem no canal utilizando o mesmo volume de água, porém sem conter o material de sólidos suspensos, de forma a minimizar os impactos gerados pelos sedimentos pretéritos depositados no canal. E após cada ensaio, os reservatórios foram limpos para o ensaio seguinte, retirando o material particulado que se instalou ao fundo. Para o auxílio da limpeza, foi instalada uma saída ao fundo do reservatório de 10m<sup>3</sup>.

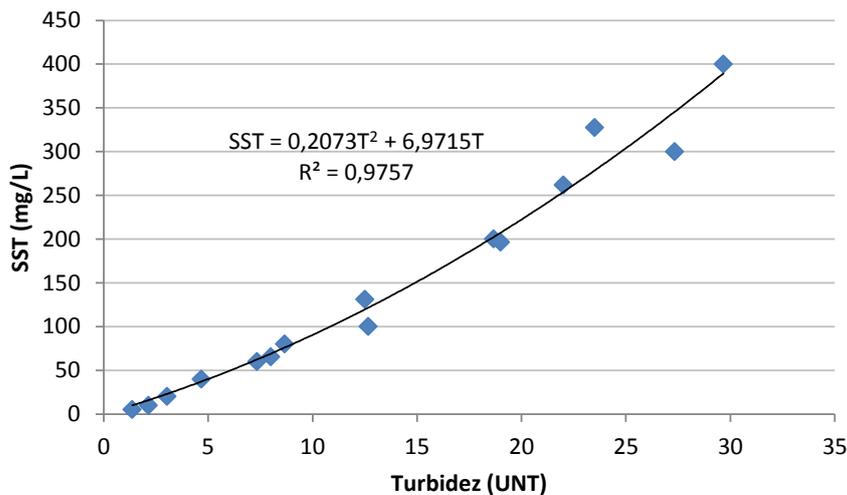
### **3.1.8 ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DA CURVA TURBIDEZ EM RELAÇÃO À CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS POR LITRO**

Após a coleta em campo, as amostras foram levadas em laboratório para a análise da turbidez de cada ponto coletado, de acordo com APHA (2005), sendo analisadas por um turbidimêtro.

Para a análise da correlação da redução de material particulado em cada ponto experimental, foram realizados ensaios em laboratório para a verificação da U.N.T. para diferentes concentrações, representando valores utilizados em campo. Este ensaio consistiu na variação da massa de material particulado misturado em um becker de 1L, a fim de obter o valor correspondente a U.N.T., realizando uma triplicata de cada ensaio. A variação da massa de material particulado ocorreu com a

utilização dos seguintes valores: 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 150; 200; 250; 300; 350 e 400mg.

Na Figura 27 pode-se verificar a relação entre sólidos suspensos totais (SST) e turbidez, construída para o material particulado empregado nesse estudo. O coeficiente de determinação da reta de ajuste ( $R^2$ ) com intercepto na origem foi de 0,97, indicando boa representação dos valores de SST por meio da turbidez.



**Figura 27. Relação entre SST e Turbidez construída para o material particulado introduzido no reservatório de descarregamento no canal gramado.**

### **3.1.9 . ANÁLISE DE REMOÇÃO DE SEDIMENTOS AO LONGO DO CANAL GRAMADO**

A primeira etapa do trabalho consiste em realizar os ensaios em campo e analisar a remoção de sedimentos através da comparação dos valores de turbidez encontrados nas amostras dos coletores.

Para a obtenção dos valores de turbidez ao longo do canal, foram obtidos em laboratório os seus respectivos valores para cada ponto e sua correspondente concentração de material particulado.

Os valores medidos puderam mostrar o quanto o canal pode remover de sedimentos, comparando o valor inicial de turbidez com os demais valores, obtendo a eficiência de remoção para cada ponto. Para isso, foi utilizada a seguinte equação:

$$E = \left( 1 - \left( \frac{N}{N_0} \right) \right) * 100 \quad (3)$$

Em que,

E: eficiência de cada amostra (%);

N: Valor de turbidez de amostra (UNT);

N<sub>0</sub>: Valor de turbidez inicial da amostra (UNT)

## 3.2 SEGUNDA ETAPA: MODELAGEM DE REMOÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO

### 3.2.1 MODELO DE REMOÇÃO DE SEDIMENTOS DE DECAIMENTO CINÉTICO DE PRIMEIRA ORDEM "K-C"

O conceito de modelo de remoção de poluentes apresentado por Wong *et al* (2006) se baseia por uma equação matemática de decaimento cinético de primeira ordem em escoamento pistonado.

Sua formulação se inicia com base na equação 1 a qual o parâmetro de concentração, C, e o comprimento do canal, x, podem variar da seguinte forma,  $C_0 \leq a \leq C$  e  $0 \leq x \leq L$ , sendo reescrita pela equação 11 da seguinte maneira:

$$\frac{da}{(a-C^*)} = -\frac{k}{q} \cdot dx \quad (4)$$

Fazendo a substituição de  $(a-C^*)$  por  $u$  e derivando-a, e em seguida substituindo-os na equação 4, que será integrado de acordo com os intervalos estabelecidos anteriormente.

$$u = d(a - C^*) \quad (5)$$

$$du=da \quad (6)$$

$$\int_{C^*}^C \frac{du}{u} = - \int_0^L \frac{k}{q} dx \quad (7)$$

Integrando a equação 7, obtemos o seguinte resultado:

$$\ln(C - C^*) - \ln(C_0 - C^*) = -\frac{k}{q}L \quad (8)$$

A equação 8 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{\ln(C - C^*)}{\ln(C_0 - C^*)} = -\frac{k}{q}L \quad (9)$$

Aplicados a ambos os lados da equação 8 por exponencial, obtemos:

$$\frac{(C - C^*)}{(C_0 - C^*)} = e^{-\frac{k}{q}L} \quad (10)$$

Assim, a equação utilizada para a modelagem se apresenta da seguinte forma:

$$C(L) = (C_0 - C^*) \cdot e^{-\frac{k}{q}L} + C^* \quad (11)$$

Em que,

C: Concentração de sedimentos em função do comprimento (M.L<sup>-3</sup>);

C<sub>0</sub>: Concentração inicial de sedimentos (M.L<sup>-3</sup>);

C\*: Concentração final, ou de equilíbrio, no tempo infinito (M.L<sup>-3</sup>);

q: Velocidade de escoamento longitudinal (L.T<sup>-1</sup>);

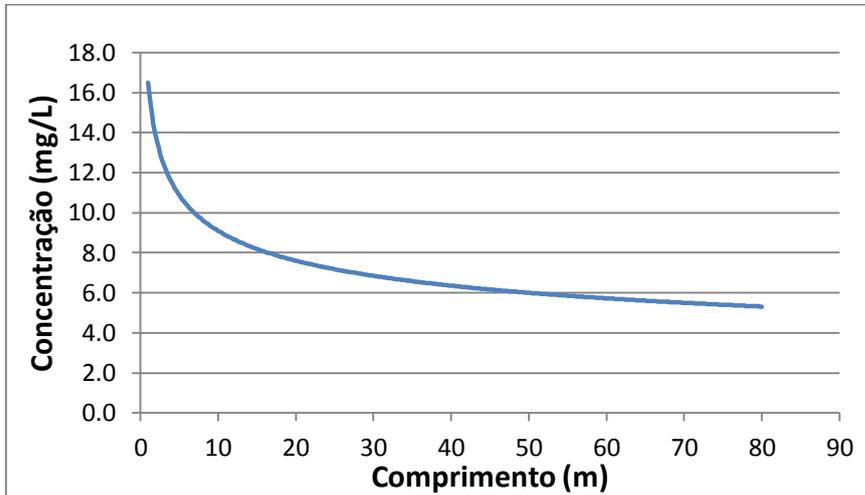
kd: Constante cinética ou de decaimento (T<sup>-1</sup>);

L: Comprimento ao longo da técnica compensatória (L);

x: Posição ao longo do comprimento do canal (L)

Os parâmetros *kd* e *C\** foram obtidos por regressão não linear, uma vez que o comportamento dos resultados, referentes aos pontos medidos de concentração de material particulado, se demonstram, graficamente, curvas de decaimento exponen-

cial. A Figura 28 exemplifica o comportamento de decaimento exponencial ocorrido no canal gramado ao longo do seu comprimento.



**Figura 28. Exemplo da curva de decaimento exponencial em função do comprimento.**

Foi obtido para cada ensaio, o valor de  $kd$  e  $C^*$ , ambos foram utilizados para a simulação do valor de concentração ao longo do comprimento, sendo depois comparado com os valores encontrados em campo.

Com os valores das concentrações medidos em campo e simulados, foi analisado o erro referente a diferença entre ambos, sendo que para tal comparação foi utilizada a seguinte equação:

$$erro (\%) = \left[ \frac{c_m - c_s}{c_m} \right] \cdot 100 \quad (12)$$

Em que:

$C_s$ : Concentração simulada obtida por meio do ajuste da equação 13 ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$C_m$ : Concentração medida no ponto correspondente ao longo do comprimento do canal ( $\text{mg.L}^{-1}$ ).

# 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 4.1 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE REMOÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO

Inicialmente, analisando o hidrograma (Figura 21), este indicou valores de  $t_B$  (tempo de base) da ordem de 10, 15 e 25 minutos, respectivamente aos volumes descarregados 5, 7 e 10m<sup>3</sup>. Porém, foi verificado que nesses tempos ainda persistia uma pequena vazão descarregada dos reservatórios para o canal gramado, que não foi possível registrar com precisão. Sendo assim, optou-se por avaliar a lâmina na posição zero do canal gramado, correspondente ao ponto de descarregamento dos volumes reservados, no ponto de montante. Para cada hidrograma apresentado na Figura 21 foram medidas as alturas registradas na posição zero, resultando nos registros H1(t), H2(t) e H3(t), respectivamente. Na Figura 29 são apresentados os registros dessas lâminas ao longo do tempo. Os resultados indicam a presença de lâmina de água até os tempos correspondentes a 15, 25 e 35 minutos, sendo esses tempos adotados como referência para os valores de  $t_B$  para cada condição investigada. Com as vazões de entrada, referentes aos hidrogramas obtidos e às alturas correspondentes foram encontradas as velocidades de escoamentos longitudinais máximas (Tabela 3), utilizando a equação 2.

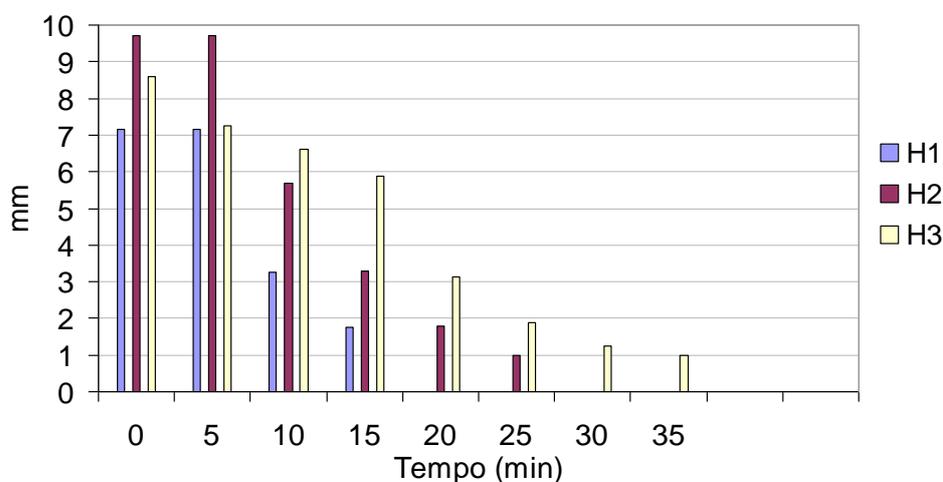


Figura 29. Registros de lâmina de água (H1(t); H2(t) e H3(t)) na posição zero do canal gramado, correspondente ao ponto de descarregamento dos volumes reservados de 5, 7 e 10m<sup>3</sup>, respectivamente.

**Tabela 3. Velocidades de escoamento longitudinal máximas correspondentes à altura de lâmina máxima.**

Reservatórios	h (cm)	Qmax. $10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$	L. $10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ )	qm( $\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{s})$ )
5.000	7,2	103	61	0,20
5.000 e 2.000	9,8	129	88	0,15
10.000	7,7	92	66	0,14

O desempenho do canal gramado na remoção de material particulado em suspensão para cada hidrograma, e concentrações afluentes em cada ponto de amostragem, pode ser verificado na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, com os valores obtidos conforme a equação 3. Apesar das oscilações em alguns pontos de amostragem, característica inerente à escala do experimento, os resultados reforçam a dependência do desempenho pelo comprimento do canal e permitem também visualizar uma tendência de estabilidade para cada situação investigada.

**Tabela 4. Desempenho do canal gramado na remoção de material particulado em suspensão (%) em 26 pontos de amostragem, medido por meio de 6 descarregamentos de volume de  $5\text{m}^3$  (registro de lâmina H1(t), vazão de entrada de  $10,0\text{L/s}$ ,  $q$  de  $0,20\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{s})$  e  $t_B$  de 15 min) com tubo curto de 75mm de diâmetro nominal em 6 diferentes concentrações iniciais ( $C_0$ ).**

Co (mg/L)	65	130	195	262	327	400
Posição	E (%)					
Coletores (m)						
1	0%	13%	0%	12%	7%	0%
2	6%	0%	6%	0%	0%	8%
3	7%	19%	17%	41%	13%	18%
4	26%	14%	19%	19%	43%	11%
5	22%	25%	28%	33%	39%	33%
6	30%	38%	30%	12%	14%	4%
7	33%	21%	72%	14%	4%	16%
8	27%	35%	53%	33%	11%	13%
9	16%	34%	63%	38%	18%	22%
10	39%	38%	58%	42%	19%	16%
12	34%	55%	17%	44%	11%	17%
14	30%	50%	65%	50%	11%	23%
16	21%	63%	65%	46%	29%	20%
18	34%	64%	64%	54%	54%	31%
20	42%	65%	75%	75%	50%	26%
25	53%	69%	72%	78%	52%	27%
30	55%	31%	61%	75%	37%	10%
35	52%	60%	67%	46%	50%	37%
40	51%	63%	9%	54%	43%	32%
45	50%	68%	64%	73%	57%	41%
50	53%	63%	76%	75%	50%	50%
60	53%	60%	74%	77%	57%	41%
70	44%	59%	72%	72%	70%	50%
80	54%	58%	72%	71%	71%	50%
90	60%	48%	60%	69%	66%	42%
100	--	--	57%	--	49%	43%

-- indica que o coletor de amostra correspondente à posição indicada não continha água em seu interior.

**Tabela 5. Desempenho do canal gramado na remoção de material particulado em suspensão (%) em 26 pontos de amostragem, medido por meio de 5 descarregamentos de volume de  $7\text{m}^3$  (registro de lâmina H2(t), vazão de entrada de 12,2Ls,  $q$  de  $0,15\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{s})$  e  $t_B$  de 25 min) com tubo curto de 75mm de diâmetro nominal em 5 diferentes concentrações iniciais ( $C_0$ ).**

$C_0$ (mg/L)	65	130	195	327	400
Posição Coletores (m)	E (%)				
1	45%	21%	18%	5%	0%
2	18%	9%	10%	7%	13%
3	16%	19%	35%	12%	41%
4	11%	12%	21%	9%	14%
5	0%	0%	3%	0%	19%
6	18%	11%	26%	4%	20%
7	5%	25%	23%	19%	24%
8	5%	16%	0%	23%	16%
9	7%	35%	13%	30%	36%
10	18%	26%	39%	26%	38%
12	27%	35%	24%	33%	29%
14	53%	60%	40%	48%	56%
16	60%	61%	52%	37%	42%
18	44%	65%	56%	44%	41%
20	55%	51%	62%	51%	58%
25	62%	68%	68%	56%	48%
30	11%	65%	66%	59%	54%
35	55%	68%	70%	53%	57%
40	69%	65%	66%	47%	34%
45	73%	73%	73%	48%	65%
50	73%	82%	74%	62%	61%
60	83%	80%	70%	54%	52%
70	80%	81%	68%	60%	63%
80	84%	85%	73%	67%	68%
90	78%	67%	70%	60%	69%
100	83%	62%	75%	65%	73%

**Tabela 6. Desempenho do canal gramado na remoção de material particulado em suspensão (%) em 26 pontos de amostragem medido por meio de 4 descarregamentos de volume de  $10\text{m}^3$  (registro de lâmina H3(t), vazão de entrada de  $9,2\text{L/s}$ ,  $q$  de  $0,14\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{s})$  e  $t_B$  de 35 min) com tubo curto de 75mm de diâmetro nominal, em 4 diferentes concentrações iniciais ( $C_0$ ).**

$C_0$ (mg/L)	65	130	195	327
Posição Coletores (m)	E (%)			
1	16%	10%	0%	5%
2	0%	31%	30%	7%
3	11%	13%	24%	12%
4	13%	0%	29%	9%
5	18%	16%	36%	0%
6	18%	33%	43%	4%
7	8%	22%	33%	19%
8	29%	27%	52%	23%
9	27%	34%	27%	30%
10	27%	51%	43%	26%
12	40%	48%	50%	33%
14	43%	51%	44%	48%
16	45%	58%	50%	37%
18	49%	45%	33%	44%
20	54%	55%	50%	51%
25	62%	64%	44%	56%
30	60%	49%	50%	59%
35	50%	42%	57%	53%
40	57%	61%	59%	47%
45	61%	58%	57%	48%
50	50%	62%	62%	62%
60	69%	70%	57%	54%
70	45%	68%	63%	60%
80	55%	71%	60%	67%
90	47%	67%	68%	60%
100	57%	71%	75%	65%

O hidrograma e as concentrações afluentes ao canal gramado também foram determinantes no desempenho da remoção de material particulado em suspensão. Para melhor avaliar esse efeito, foi verificada a média das cinco maiores eficiências em cada condição investigada e o valor correspondente foi relacionado à sua posição para cada hidrograma em cada concentração inicial ( $C_0$ ), conforme Tabela 7 e Figura 30. A mesma análise foi realizada para o conjunto de dados de cada hidrograma afluente e os resultados foram avaliados com intervalo de confiança de 95%, conforme Tabela 8.

Por meio da análise da Tabela 7 e da Figura 30 pode-se verificar que, para os três hidrogramas investigados, as menores concentrações requereram de 20 a 60m

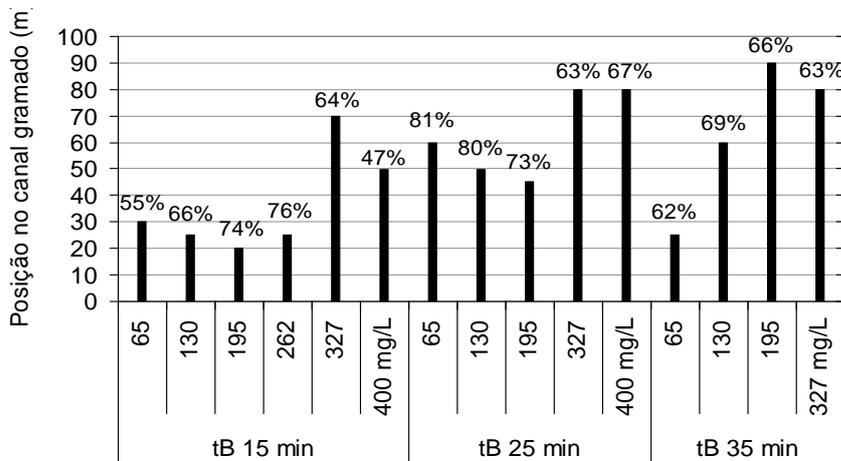
para atingir a eficiência máxima de remoção de material particulado, enquanto que para as maiores concentrações afluentes foram necessários de 50 a 90m.

Na Tabela 8 verificam-se que a média das máximas eficiências ficaram entre 65 e 73%±3% para os três hidrogramas, todavia a posição em que essas ocorrem variaram para cada descarregamento. Assim, foram avaliadas as lâminas ao longo do comprimento do canal para diferentes tempos, sendo os mesmos relativizados em relação ao tempo médio de translação da onda de cheia no canal ( $t_T$ ). O tempo de translação no canal ( $t_T$ ) é da ordem de 10,5±2,5 minutos com velocidade média de aproximadamente 0,14±2m/s. Sendo assim, os hidrogramas simulados apresentaram tempo de base da ordem de 1,4; 2,4 e 3,3 vezes o tempo de translação ( $t_B/t_T$ ).

**Tabela 7. Posição dos pontos de amostragem (m) em que a média das cinco maiores eficiências ( $E^*$ (%)) foi obtida para cada hidrograma, identificada pelo tempo de base ( $t_B$ ) e concentrações iniciais ( $C_0$ ) ao canal gramado.**

**$E^*$ (%) refere-se a média das 5 maiores eficiências ao longo do comprimento do canal gramado**

$t_B$ (min)	$C_0$ (mg/L)	$E^*$ (%)	Posição (m)
15	65	55%	30
	130	66%	25
	195	74%	20
	262	76%	25
	327	64%	70
	400	47%	50
25	65	81%	60
	130	80%	50
	195	73%	45
	327	63%	80
	400	67%	80
35	65	62%	25
	130	69%	60
	195	66%	90
	327	63%	80



**Figura 30. Posição dos pontos de amostragem (m) em que a média das cinco maiores eficiências foi obtida para cada hidrograma e concentrações iniciais (mg/L) ao canal gramado. Os rótulos representam a média das 5 maiores eficiências ao longo do comprimento do canal gramado.**

**Tabela 8. Posição dos pontos de amostragem (m) em que a média das cinco maiores eficiências ( $E^*(\%)$ ) foi obtida para cada hidrograma, considerando todas as concentrações iniciais (mg/L) ao canal gramado.**

$t_B(\text{min})$ [ $t_B/t_T$ ]	$C_o$ (mg/L)	$E^*(\%)$	Posição (m)
15 [1,4]	65	64±3%	--
	130		18
	195		7
	262		20
	327		80
	400		--
	Média ± intervalo 95%		31 ± 26
25 [2,4]	65	73±3%	45
	130		45
	195		45
	327		--
	400		100
	Média ± intervalo 95%		59 ± 24
35 [3,3]	65	65±3%	60
	130		60
	195		90
	327		80
	Média ± intervalo 95%		73 ± 15

-- indica que o valor referente a média das eficiências máximas para todas as concentrações afluentes em cada hidrograma de entrada não foi atingido.

Na Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11 são apresentadas as medidas da evolução das lâminas em sete posições equidistantes ao longo do comprimento do canal gramado. Nessas, pode-se visualizar a passagem da onda de cheia para cada hidrograma afluente investigado. Estão em realce cinza claro o momento em que as lâminas são detectadas simultaneamente na entrada e na saída de cada hidrograma. Verifica-se que esse tempo corresponde a 15 minutos para o primeiro hidrograma e a intervalos de 15 a 25 minutos e de 15 a 35 minutos para o segundo e terceiro hidrogramas, respectivamente.

**Tabela 9. Evolução da lâmina (cm) com a posição dos pontos de amostragem das alturas de lâmina (m) em diferentes tempos (min), contados a partir do início do descarregamento do reservatório de 5m<sup>3</sup>, responsável pelo t<sub>B</sub> de 15 minutos. t<sub>B</sub>/t<sub>T</sub> de 1,4.**

TEMPO (min)	COMPRIMENTO (m)						
	0	15	30	45	60	75	90
	LÂMINA MÉDIA DE ÁGUA NO CANAL (cm)*						
0	7,2	-	-	-	-	-	-
5	7,2	7,2	6,8	-	-	-	-
10	3,3	4,8	5,2	6,0	5,1	-	-
15	1,8	2,4	2,6	3,3	3,7	4,2	4,0
20	-	1,1	1,4	1,6	2,0	3,0	2,9
25	-	-	1,0	1,0	1,3	2,2	2,5
30	-	-	-	-	1,0	1,7	1,9
35	-	-	-	-	-	-	1,0

\* média aritmética de seis medidas.

**Tabela 10. Evolução da lâmina (cm) com a posição dos pontos de amostragem das alturas de lâmina (m) em diferentes tempos (min), contados a partir do início do descarregamento do reservatório de 7m<sup>3</sup>, responsável pelo t<sub>B</sub> de 25 minutos. t<sub>B</sub>/t<sub>T</sub> de 2,4.**

TEMPO (min)	COMPRIMENTO (m)						
	0	15	30	45	60	75	90
	LÂMINA MÉDIA DE ÁGUA NO CANAL (cm)*						
0	9,7	-	-	-	-	-	-
5	9,7	9,8	8,7	-	-	-	-
10	5,7	6,1	7,1	8,5	7,6	6,5	-
15	3,3	3,4	3,5	4,1	4,4	4,7	5,4
20	1,8	2,1	1,8	2,1	2,8	3,0	3,7
25	1,0	1,1	1,1	1,1	2,0	2,5	2,7
30	-	-	-	-	1,9	2,2	2,0
35	-	-	-	-	1,0	1,8	1,8
40	-	-	-	-	-	1,1	1,1

\* média aritmética de cinco medidas.

**Tabela 11. Evolução da lâmina (cm) com a posição dos pontos de amostragem das alturas de lâmina (m) em diferentes tempos (min), contados a partir do início do descarregamento do reservatório de 10m<sup>3</sup>, responsável pelo t<sub>B</sub> de 35 minutos. t<sub>B</sub>/t<sub>T</sub> de 3,3.**

TEMPO (min)	COMPRIMENTO (m)						
	0	15	30	45	60	75	90
	LÂMINA MÉDIA DE ÁGUA NO CANAL (cm)						
0	4,6	-	-	-	-	-	-
5	7,3	8,0	7,7	-	-	-	-
10	6,6	7,5	7,4	7,2	6,8	-	-
15	5,9	6,8	7,0	6,6	7,0	6,8	6,8
20	3,1	5,3	4,1	4,3	5,6	6,3	5,8
25	1,9	2,3	2,3	3,0	3,5	4,3	4,3
30	1,3	1,3	1,3	1,8	2,4	3,0	3,3
35	1,0	1,0	1,0	1,2	1,6	2,4	2,3
40	-	-	-	1,0	1,0	2,0	2,1
45	-	-	-	-	-	1,3	1,3

\* média aritmética de quatro medidas.

A Figura 31, Figura 32 e Figura 33 foram construídas nesses intervalos de tempo, podendo-se verificar com mais clareza a passagem da onda de cheia para as situações em que o canal apresentava vazão simultânea de entrada e saída. Fica evidente que a maior relação t<sub>B</sub>/t<sub>T</sub> apresentou tendência a obter escoamento em estado estacionário no tempo correspondente a 15 minutos, conforme Figura 34. Da mesma forma, a permanência da lâmina e a evolução da onda de cheia foram verificadas por maior tempo. Os resultados indicaram que essas situações requerem maior comprimento para que seja atingida a máxima eficiência do canal. O quociente t<sub>B</sub>/t<sub>T</sub> respondeu de forma diretamente proporcional às posições de máximas eficiências ao longo do canal, com correlação de 0,98.

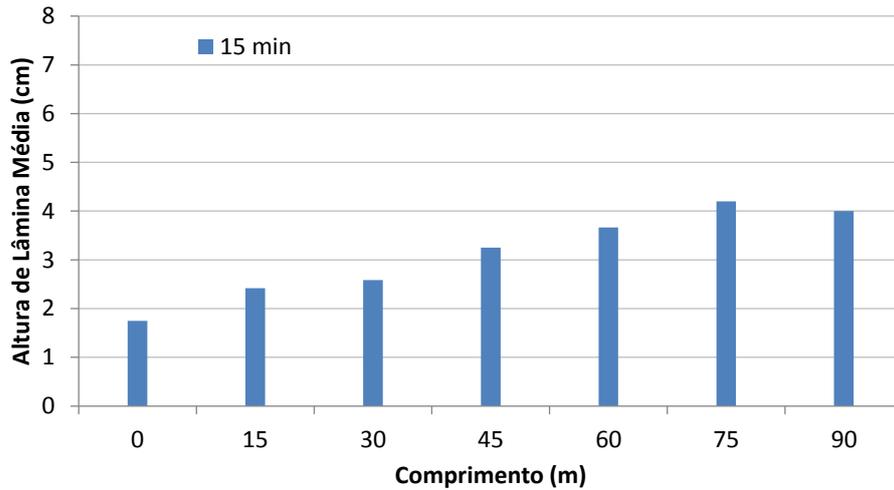


Figura 31. Altura média de seis medidas de lâmina (cm) de água para diferentes tempos (min) após descarregamento do reservatório em diferentes posições (m) do canal gramado.  $t_B$  de 15 min. para medida realizada no tempo 15 min.  $t_B/t_T$  de 1,4.

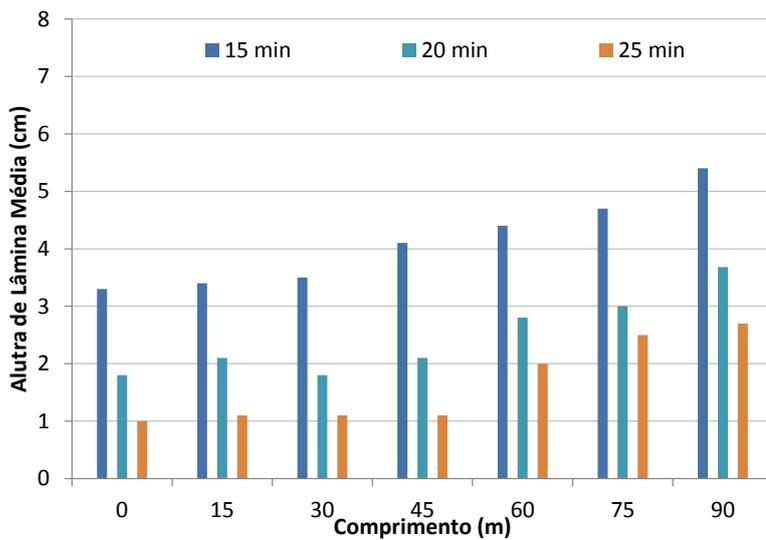


Figura 32. Altura média de cinco medidas de lâmina de água (cm) para diferentes tempos (min) após descarregamento do reservatório em diferentes posições do canal gramado (m).  $t_B$  de 25 min. para medidas realizadas nos tempos 15, 20 e 25 min.  $t_B/t_T$  de 2,4.

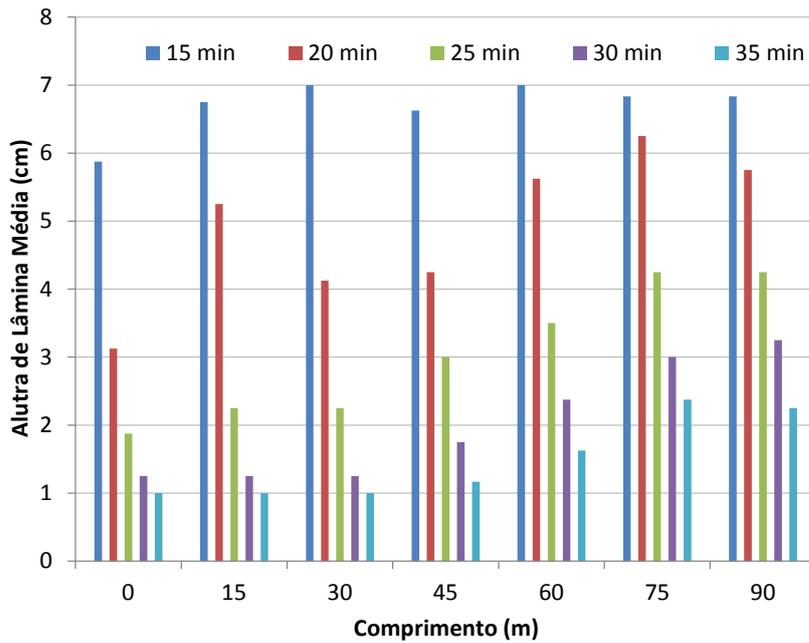


Figura 33. Altura média de quatro medidas de lâmina de água (cm) para diferentes tempos (min) após descarregamento do reservatório em diferentes posições do canal gramado (m).  $t_B$  de 35 min. para medidas realizadas nos tempos 15, 20, 25, 30 e 35 min.  $t_B/t_T$  de 3,3.

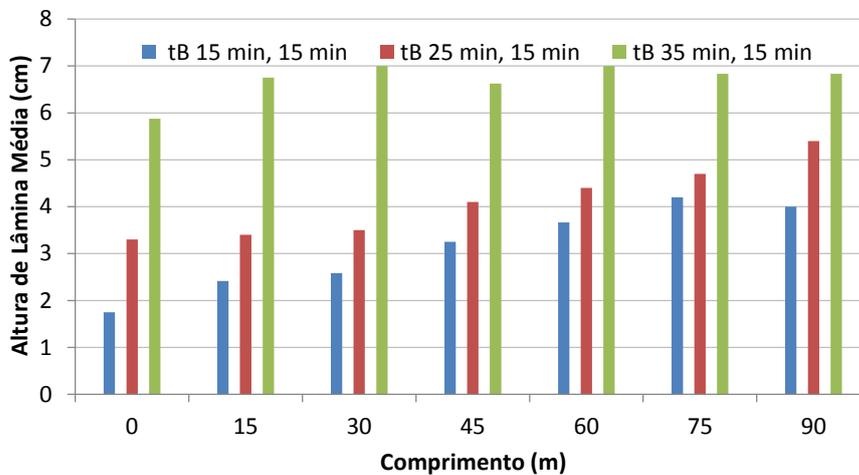


Figura 34. Altura média de quinze medidas de lâmina de água (cm) para medida no tempo 15 minutos após descarregamento do reservatório em diferentes posições do canal gramado (m).  $t_B$  de 15, 25 e 35 min.  $t_B/t_T$  de 1,4; 2,4 e 3,33, respectivamente.

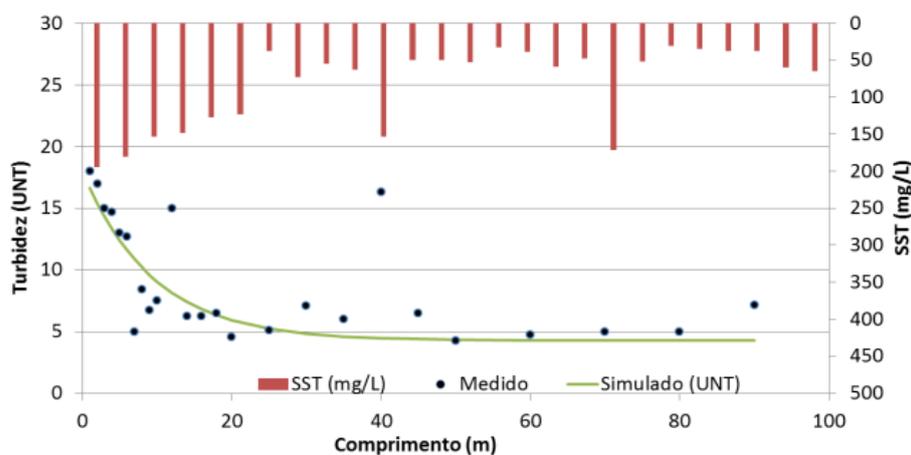
#### 4.2 APLICAÇÃO DO MODELO DE REMOÇÃO POR DECAIMENTO EXPONENCIAL “K-C”

Verificando os parâmetros, cinético ( $kd$ ) e de equilíbrio ( $C^*$ ), do modelo clássico de escoamento pistonado concebido para o estado estacionário, pode ser aplica-

do na avaliação da remoção de material particulado suspenso, em escoamento dinâmico e, se assim for, quais as relações que tais parâmetros possuem com as concentrações afluentes. Nesse caso, poder-se-ia avaliar o comportamento com base fenomenológica, inclusive possibilitando generalizações.

Assim, na Figura 35, Figura 36 e Figura 37 são apresentados alguns exemplos dos resultados medidos e calculados, a partir da Equação 11, com parâmetros  $kd$  e  $C^*$  ajustados, referentes às concentrações residuais remanescentes de material particulado, com relação à posição para  $C_0$  de  $195\text{mg.L}^{-1}$ , com valores de  $t_B/t_T$  de 1,4; 2,4 e 3,3, respectivamente. Verificou-se que o decaimento da turbidez, bem como da concentração correspondente, pode ser acompanhado pelo modelo a partir do ajuste dos parâmetros da Equação 11. A qualidade dos ajustes foi avaliada por meio do erro médio, conforme Equação 12 e os resultados podem ser visualizados na Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 para os hidrogramas correspondentes a  $t_B/t_T$  de 1,4; 2,4 e 3,3, respectivamente.

Em termos médios, o módulo do erro relativo variou entre 3% e 8%, sendo que os maiores valores de erro médio obtidos tendem a se concentrar no hidrograma correspondente a  $t_B/t_T$  de 1,4 e nas menores concentração iniciais de material particulado investigado.



**Figura 35. Concentrações residuais remanescentes de material particulado medidas e simuladas (mg/L) com relação à posição (m). Resultados em unidades de turbidez no eixo principal das ordenadas e em sólidos suspensos totais no eixo secundário das ordenadas. Condições dos ensaios:  $C_0$  de  $195\text{mg.L}^{-1}$ ;  $q$  de  $0,20\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{s})$ ;  $t_B$  de 15 min;  $t_B/t_T$  de 1,4.**

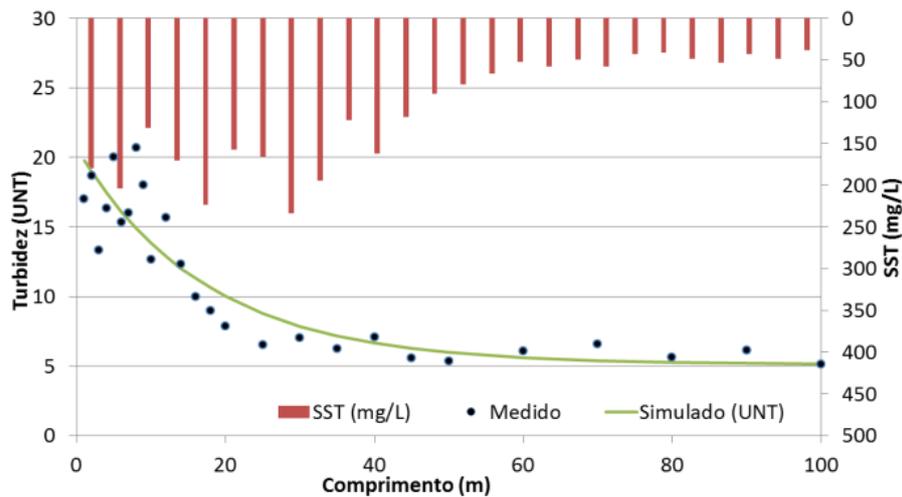


Figura 36. Concentrações residuais remanescentes de material particulado medidas e simuladas (mg/L) com relação à posição (m). Resultados em unidades de turbidez no eixo principal das ordenadas e em sólidos suspensos totais no eixo secundário das ordenadas. Condições dos ensaios:  $C_o$  de  $195\text{mg.L}^{-1}$ ;  $q$  de  $0,15\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{s})$ ;  $t_B$  de 25 min;  $t_B/t_T$  de 2,4.

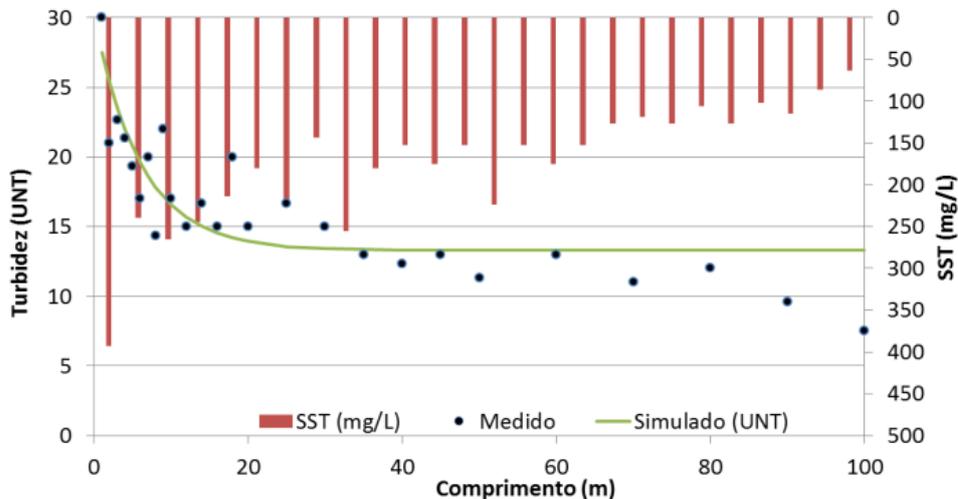


Figura 37. Concentrações residuais remanescentes de material particulado medidas e simuladas (mg/L) com relação a posição (m). Resultados em unidades de turbidez no eixo principal das ordenadas e em sólidos suspensos totais no eixo secundário das ordenadas. Condições dos ensaios:  $C_o$  de  $195\text{mg.L}^{-1}$ ;  $q$  de  $0,14\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{s})$ ;  $t_B$  de 35 min;  $t_B/t_T$  de 3,3.

**Tabela 12. Parâmetros obtidos por meio do ajuste não linear da Equação 3 aos dados experimentais para diferentes valores de concentração inicial ( $C_0$ ) no canal gramado e erro médio relativo em módulo (E), para ensaio com a vazão de entrada de 10,0L/s,  $q$  de 0,20 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.s) e  $t_B$  de 15 min.  $t_B/t_T$  de 1,4.**

Co (mg/L)	Co (UNT)	$k_d$ (s <sup>-1</sup> )	C* (mg/l)	C* (UNT)	Erro*
65	7,9	0,0125	24,4	3,2	10%
130	14,0	0,0200	52,8	6,3	15%
195	18,0	0,0267	54,5	6,5	23%
263	21,0	0,0140	63,4	7,4	19%
327	26,0	0,0029	61,5	7,2	17%
400	30,0	0,0016	140,1	14,1	11%

\* Refere-se a média dos erros com referência a turbidez ao longo dos 26 pontos de amostragem distribuídos nos 100m de extensão do canal gramado

**Tabela 13. Parâmetros obtidos por meio do ajuste não linear da Equação 3 aos dados experimentais para diferentes valores de concentração inicial ( $C_0$ ) no canal gramado e erro médio relativo em módulo (E), para ensaio com a vazão média de entrada de 12,2L/s,  $q$  de 0,20 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.s) e  $t_B$  de 25 min.  $t_B/t_T$  de 2,4.**

Co (mg/L)	Co (UNT)	K (s <sup>-1</sup> )	C* (mg/l)	C* (UNT)	Erro*
65	8,7	0,0051	14,3	1,9	20%
130	15,0	0,0092	33,7	4,3	17%
195	17,0	0,0087	41,2	5,1	25%
327	25,7	0,0091	94,1	10,3	10%
400	32,0	0,0115	116,0	12,2	14%

\* Refere-se a média dos erros com referência a turbidez ao longo dos 26 pontos de amostragem distribuídos nos 100m de extensão do canal gramado.

**Tabela 14. Parâmetros obtidos por meio do ajuste não linear da Equação 3 aos dados experimentais para diferentes valores de concentração inicial ( $C_0$ ) no canal gramado e erro médio relativo em módulo (E), para ensaio com a vazão média de entrada de 9,2L/s,  $q$  de 0,14 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.s) e  $t_B$  de 35 min.  $t_B/t_T$  de 3,3.**

Co (mg/L)	Co (UNT)	$k_d$ (s <sup>-1</sup> )	C* (mg/l)	C* (UNT)	Erro*
65	8,0	0,012	44,1	5,4	14%
130	14,0	0,012	68,2	7,9	13%
195	18,0	0,023	129,7	9,6	21%
327	25,7	0,0087	95,9	10,4	10%

\* Refere-se a média dos erros com referência a turbidez ao longo dos 26 pontos de amostragem distribuídos nos 100m de extensão do canal gramado.

Embora a avaliação do erro médio seja importante para verificação do ajuste matemático aos dados experimentais, os valores das concentrações residuais medidas e calculadas são significativos nas posições finais, pois podem melhor indicar a eficiência nas posições de jusante do canal gramado. Nesse sentido, os resultados das estimações a partir do modelo foram também avaliados considerando as posições finais do canal gramado, sendo essas definidas como 80, 90 e 100 m. Os resultados apresentados na Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17 indicam que essa avaliação produziu maiores erros médios entre os resultados medidos e calculados quando comparado a média de todas as 26 posições. Todavia, a avaliação nas porções de jusante é mais representativa do desempenho do canal gramado. Evidentemente, poder-se-ia impor uma restrição no ajuste matemático de modo que o parâmetro  $C^*$  produzisse menores erros nas posições de jusante do canal gramado, o que incorreria em alteração dos valores médios nas demais posições. No entanto, julgou-se tal procedimento desnecessário para o estudo em questão, visto que a concentração calculada pelo modelo nas diferentes posições ao longo do comprimento do canal foi adequada, tal como demonstram os resultados, bem como sua representação pelos parâmetros  $kd$  e  $C^*$  da Equação 11.

**Tabela 15. Turbidez residual remanescente medida e calculada (UNT) para  $C_0$  de 65mg/L nos últimos 20m do canal gramado, nas posições 80; 90 e 100m.**

$t_B$ (min) [ $t_B/t_T$ ]	Posição (m)	Turb. Med. (UNT)	Turb. Calc. (UNT)	Erro (%)
15 [1,4]	80	3,6	3,2	12%
	90	3,2	3,2	0%
	100	-	-	-
25 [2,4]	80	2,4	2,8	15%
	90	3,3	2,5	23%
	100	2,5	2,3	6%
35 [3,3]	80	5,7	5,4	5%
	90	6,8	5,4	20%
	100	5,5	5,4	1%

**Tabela 16. Turbidez residual remanescente medida e calculada (UNT) para Co de 195mg/L nos últimos 20m do canal gramado, nas posições 80; 90 e 100m.**

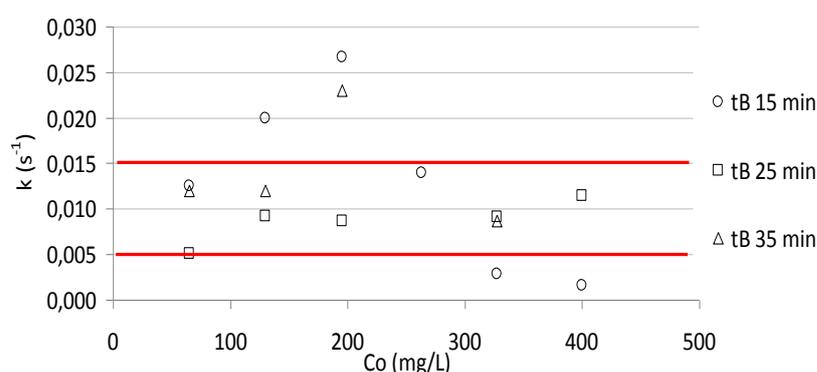
$t_B$ (min)	Posição	Turb.	Turb.	Erro
$[t_B/t_T]$	(m)	Med.	Calc.	(%)
		(UNT)	(UNT)	
15 [1,4]	80	5,0	6,5	30%
	90	7,2	6,5	10%
	100	7,7	6,5	15%
25 [2,4]	80	5,6	5,2	6%
	90	6,1	5,2	16%
	100	5,1	5,1	1%
35 [3,3]	80	12	9,6	-20%
	90	9,6	9,6	0%
	100	7,5	9,6	28%

**Tabela 17. Turbidez residual remanescente medida e calculada (UNT) para Co de 327mg/L nos últimos 20m do canal gramado, nas posições 80; 90 e 100m.**

$t_B$ (min)	Posição	Turb.	Turb.	Erro
$[t_B/t_T]$	(m)	Med.	Calc.	(%)
		(UNT)	(UNT)	
15 [1,4]	80	8,0	7,2	11%
	90	9,5	6,0	37%
	100	14,3	5,1	65%
25 [2,4]	80	8,9	10,4	17%
	90	10,7	10,4	3%
	100	9,5	10,3	8%
35 [3,3]	80	8,9	10,6	19%
	90	10,7	10,5	2%
	100	9,5	10,5	10%

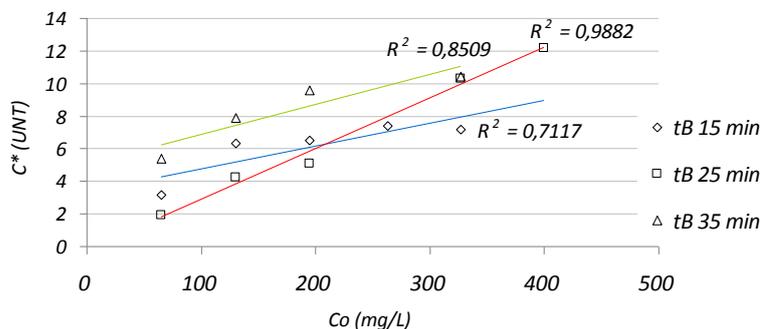
Especificamente em relação aos valores obtidos para as constantes de decaimento ( $kd$ ), as quais representam a frequência de remoção de material particulado,

para as diferentes condições analisadas, verifica-se que apresentaram comportamento aleatório em relação à concentração afluyente ao canal gramado ( $C_0$ ). Todavia, pela Figura 38 verifica-se que 70% dos valores da constante de decaimento ( $kd$ ) estão entre  $0,005$  e  $0,015s^{-1}$ , sendo que ao desconsiderar o hidrograma representado por  $t_B$  de 15 minutos, 90% dos dados estão contidos no intervalo  $0,005 \leq kd \leq 0,015s^{-1}$  e 85% no intervalo  $0,007 \leq kd \leq 0,012s^{-1}$ . Assim, pode-se inferir que os valores de  $kd$  tendem a se concentrar em faixas mais estreitas para escoamento com maior tendência ao equilíbrio (Estado Estacionário), fato que ocorre para maiores quocientes  $t_B/t_T$ . Evidentemente, a taxa de remoção por comprimento do canal depende também das características do material particulado em suspensão, e qualquer extrapolação deve ser avaliada com ressalvas.



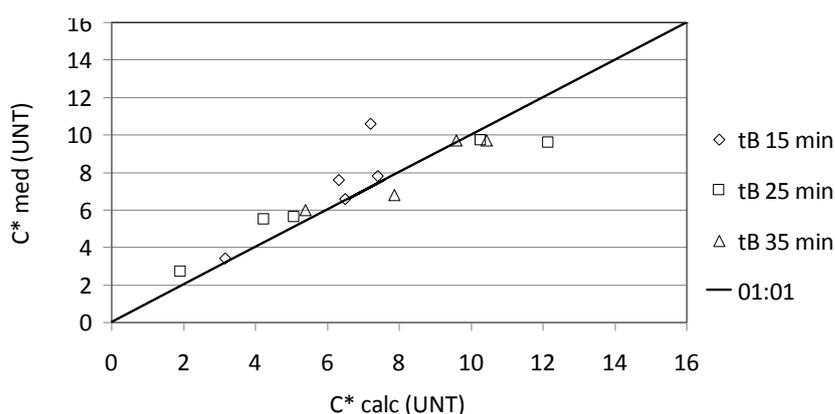
**Figura 38. Valores da constante de decaimento ( $kd$ ) para diferentes hidrogramas e concentrações iniciais ( $C_0$ ) afluentes ao canal gramado.**

A relação diretamente proporcional às concentrações de equilíbrio ( $C^*$ ) para diferentes hidrogramas e concentrações iniciais ( $C_0$ ) afluentes ao canal gramado, foi observada em todos os casos e pode ser visualizada na Figura 39. Por meio dessa figura, nota-se que, independentemente do hidrograma, concentrações afluentes maiores tendem a produzir maiores residuais à jusante do canal gramado, e que o comportamento pode ser explicado por uma reta com valor de coeficiente de determinação ( $R^2$ ), variando de 0,71 a 0,98. Verifica-se também que o menor coeficiente angular foi obtido para  $t_B/t_T$  de 1,4, indicando menor sensibilidade de  $C^*$  frente a  $C_0$ , provavelmente devido ao intervalo restrito em que foram observadas vazões simultâneas de afluentes e efluentes ao canal gramado (Tabela 9 e Tabela 11), quando comparado aos demais hidrogramas investigados.



**Figura 39. Relação entre as concentrações de equilíbrio (C\*) para diferentes hidrogramas e concentrações iniciais (Co) afluentes ao canal gramado.**

Na Figura 40 foram agrupados os valores de C\* calculados e C\* medidos, sendo os dados medidos obtidos pela média dos últimos 20m do canal nas posições de 80, 90 e 100m. Verifica-se que embora tenham sido observados maiores erros médios nas posições à jusante do canal, quando comparados com a média de todas as 26 posições monitoradas, os valores calculados e ajustados se concentram satisfatoriamente em torno da reta de ajuste perfeito (1:1) para todos os hidrogramas investigados. Tais resultados são fortes indícios da representatividade do modelo, e de seus parâmetros associados, na avaliação do desempenho do canal gramado para remoção de material particulado em suspensão.



**Figura 40. Valores de C\* calculados e C\* medidos, sendo os dados medidos obtidos pela média dos últimos 20m do canal nas posições de 80, 90 e 100m.**

Em linhas gerais, pode-se dizer que o hidrograma e concentrações afluentes interferem no desempenho do canal gramado e que essas relações podem ser ex-

pressas pelo quociente  $t_B/t_T$  e pelos parâmetros ( $kd$  e  $C^*$ ) da Equação 11, que descreve o decaimento da concentração residual remanescente ao longo do comprimento do canal. Embora exista uma série de simplificações, decorrentes das hipóteses lançadas para o estado estacionário, acredita-se que o escoamento predominantemente unidirecional no canal gramado e sua geometria francamente linear, favorecem o pressuposto da dispersão longitudinal nula, presente na formulação original da Equação 11. Tal observação é reforçada pelo fato de que o modelo pode ser aplicado aos três hidrogramas investigados, com erros médios muito semelhantes.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados e nos objetivos propostos, pode-se confirmar a ocorrência do processo de remoção de material particulado no canal gramado em estudo. Tal afirmação se valida pelos dados amostrados que indicaram que a eficiência máxima de remoção variou de 47 a 81% em posições de 20 a 90m, para situações independentes dos valores de vazão de descarga e concentração de material particulado inicial. Esses dados indicam que o canal gramado possui, em piores condições de uso, uma remoção mínima de 47%, o que gera um benefício para a qualidade das águas pluviais locais.

Em relação ao tempo de base, concluiu-se que a posição média das máximas eficiências foi encontrada para diferentes pontos ao longo do canal, verificando que para valores de tempos de base variam proporcionalmente com a posição da média de máxima eficiência. Esta conclusão se verifica através de que um evento de maior duração requer uma maior distância para uma determinada eficiência de remoção.

Quanto à modelagem matemática da remoção do canal, verificou-se que 70% dos valores da constante de decaimento ( $kd$ ) se apresentam entre  $0,005$  e  $0,015s^{-1}$ , referente a todos os dados analisados, o que pode indicar um padrão para o parâmetro  $kd$ . Em relação ao parâmetro  $C^*$  pode-se verificar uma relação direta e proporcional à medida em que o valor da  $Co$  aumenta.

Portanto, pode-se concluir que a remoção do material particulado em canal gramado realmente ocorre para uma situação simulada em escala real. Quanto à

modelagem matemática da remoção, os resultados apresentados mostram que a extrapolação de dados deve ser considerada à luz das hipóteses simplificadoras adotadas, bem como das características particulares inerentes ao objeto de estudo avaliado.

## 6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

American Public Health Association Standard Methods (APHA): For the examination water & wastewater. 21<sup>o</sup> edição, Centennial Edition, 2005

ARMSON, D.; STRINGER, P.; ENNOS, A.R. The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK, Urban Forestry & Urban Greening, vol. 12, pp. 282-286, U.K., 2013.

BARRETT, M.E.; WALSH, P.M.; MALINA, J.F.; CHARBENEAU, R.J. Performance of Vegetative Controls for Treating Highway Runoff, Journal of Environmental Engineering, ASCE, vol 124, pp. 1121-1128, EUA, 11/1998.

BAPTISTA, M.; BARRAUD, S.; NASCIMENTO, N.; Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana, Editora ABRH, Belo Horizonte, MG, 2005.

CARNEIRO, P.R.F.; MIGUEZ, M.G.; Controle de inundações em bacias hidrográficas metropolitanas, Editora AnnaBlume, 1<sup>o</sup>Edição, São Paulo, SP, 03/2011.

CARVALHO, P.F.; BRAGA, R., Da negação à Reafirmação da Natureza na Cidade: o conceito de “renaturalização” com suporte à política urbana, VIII Simpósio Nacional de Geografia Urbana, Grupo de Pesquisa Análise e Planejamento Territorial (GPAPT), Recife, PE, 2003.

California Stormwater Quality Association (CASQA). California Stormwater BMP Handbook New Development and Redevelopment, EUA, 01/2003.

DANIELS, R.B.; GILLIAM, J.W. Sediment and Chemical Load Reduction by Grass and Riparian Filters, Soil Science Society of America Journal, vol. 60, pp. 246-251, EUA, 02/1996.

DELETIC, A. Sediment transport in urban runoff over grassed areas, Journal of Hydrology, vol. 301, pp. 108-122, EUA, 2005

DELETIC, A.; FLETCHER, T.D. Performance of Grass Filters Used for Stormwater Treatment – A Field And Modelling Study, Journal of Hydrology, vol. 317, pp. 261 – 275, 2006

DILLAHA, T.A.; SHERRARD, J.H.; LEE, D. Longe-Term Effectiveness and Maintenance of Vegetative Filter Strips. Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Civil Engineering, Virginia, EUA, 1986.

EGODAWATTA, P.; GOONETILLEKE, A. Characteristics of Pollutants Built-up on Residential Road Surfaces, The Seventh International Conference on Hydro Science and Engineering (ICHE), Filadélfia, Pensilvânia, EUA, 09/2006.

EPA, Environmental Protection Agency, Washington, 1999.

Engineer Research and Development Center (ERDC). Evaluation of Surface Runoff Water in a Freshwater Confined Disposal Facility—Effects of Vegetation, EUA, 08/2002.

FELIPE, M.C. Avaliação e Modelagem Matemática de Remoção de Material Particulado em Canal Gramado Construído em Escala Real no Campus UFSCar, São Carlos – SP, (Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal de São Carlos-UFSCar, São Carlos, SP, 2014

FERREIRA, Y.N. Metr pole Sustentável? Não   uma questão urbana, São Paulo em Perspectiva, vol. 14, n. 4, 2000.

GHARABAGHI, B.; RUDRA, R.P.; WHITELY, H.R.; DICKINSON, W.T. Sediment-Removal Efficiency of Vegetation Filter Strips, School of Engineering of Guelph, Ontario, Canada, 2000

GUTIERREZ, L. A. R. Avalia o da qualidade da água da chuva de um sistema Filtro-Vala-Trincheira de infiltra o no tratamento do escoamento superficial direto predial em escala real em São Carlos – SP, (Disserta o de Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal de São Carlos–UFSCar, São Carlos, SP, 2011.

HELMERS, M.J.; EISENHAUER, D.E.; DOSSKEY, M.G. Flow Pathways and Sediment Trapping in a Field-Scale Vegetative Filter, American Society of Agricultural Engineers, vol. 48, pp. 935-968, EUA, 01/2005.

HOLMAN-DODDS, J.K.; BRADLEY, A.A.; POTTER, K.W. Evaluation of hydrologic benefits of infiltration based urban storm water management, Journal of the American Water Resources Association, Paper n.1193, EUA, 02/2003.

HUNT, W.F.; M. ASCE; HATHAWAY, J.M.; WINSTON, R.J.; JADLOCKI, S.J. Runoff Volume Reduction by a Level Spreader-Vegetated Filter Strip System in Suburban Charlotte, N.C, Journal of Hydrologic Engineering, pp. 499-503, EUA, 06/2010.

LEE, J.H.; BANG, K.W. Characterization of Urban Stormwater Runoff, Water Resource, vol. 34, n.6, pp. 1773-1780, EUA, 2000.

LORANDI, R; TAKEMOTO, F; TORRESAN, F.E. Carta de potencial   erosão laminar da parte superior da bacia do córrego do Monjolinho (São Carlos, SP). Revista Brasileira de Cartografia. N  53, dezembro, 2001; p. 111-117.

LUCAS, A.H. Monitoramento e modelagem de um sistema Filtro-Vala-Trincheira de Infiltra o em escala real. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2011.

MCKERGON, L. A.; WEAVER, D. M.; PROSSER, I. P.; GRAYSON, R.B.; REED, A. E. G. Before and after riparian management: Sediment and nutrient exports from a small agricultural catchment, Western Australia, Journal of Hydrology, vol.270, n.1, pp.253–272, 2003.

MANKIN, K.R.; NGANDU, D.M.; BARDEN, C.J.; HUTCHINSON, S.L.; GEYER, W.A. Grass-Shrub riparian buffer removal of sediment phosphorus, and nitrogen from simulated runoff, *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 43, n.5, pp.1108-1116, EUA, 10/2003.

MARYLAND. *Maryland Stormwater Design Manual*. Vol I e II. Maryland Department of the Environment, Baltimore, Maryland, 2000.

MATOS, J.S. Aspectos Históricos a Actuais da Evolução da Drenagem de Águas Residuais em Meio Urbano, *Revista Engenharia Civil*, n.16, pp. 13-23, Lisboa, Portugal, 2003.

OSBORNE, L. L.; KOVACIC, D. A. Riparian vegetated buffer strips in water quality restoration and stream management, *Freshwater Biology*, vol.59, pp. 243-258, 1993.

POLETO, C. SUDS (Sustainable Urban Drainage System): Uma Contextualização Histórica, *Revista Thema*, vol.8, pp.1-12, 2011.

POLETO, C.; MERTEN, C.H. Urban Street Pollutants, *Revista Pesquisas em Geociências*, vol. 35, pp. 3-8, 2008.

QIN, H.; LI, Z.; FU, G. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics, *Journal of Environmental Management*, vol. 129, pp. 577-585, U.K., 2013.

SOUZA, C.F Mecanismos técnico-institucionais para sustentabilidade da drenagem urbana. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.

SOBRINHA, L.A. Monitoramento e Modelagem de um Poço de Infiltração de Águas Pluviais em Escala Real e com Filtro na Tampa. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2012.

STAGGE, J.H.; Field Evaluation of Hydrologic and Water Quality Benefits of Grass Swales for Managing Highway Runoff, University of Maryland, Maryland, EUA, 2006.

SUDS. Sustainable Drainage – Cambridge Design and Adoption Guide. Environment and Planning Cambridge City Council, Cambridge, Inglaterra.

TAVANTI, D.R.; BARBASSA, A.P. Análise dos Desenvolvimentos Urbanos de Baixo Impacto e Convencional, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 14, n. 4, pp. 17-28, Out/Dez 2012.

TUCCI, C. Gestão de Águas Pluviais Urbanas: Ministério das Cidades: Global Water Partnership: World Bank: Unesco, 2005.

WAHL, S. Stormwater Best Management Practices - A first guide for landscapes architects, 06/2009.

WONG, T.; FLETCHER, T.; DUNCAN, H.; JENKINS, G. Modelling urban stormwater treatment- a unified approach, *Ecological Engineering*, vol 27, pp. 58-70, 2006.