

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**VINÍCIUS PEREIRA MELLO RIBEIRO**

**EFEITO DA RUGOSIDADE NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM  
ESCOAMENTOS SUPERFICIAIS UTILIZANDO CANAL HIDRÁULICO**

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2024**

**VINÍCIUS PEREIRA MELLO RIBEIRO**

**EFEITO DA RUGOSIDADE NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM  
ESCOAMENTOS SUPERFICIAIS UTILIZANDO CANAL HIDRÁULICO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental, pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Silveira.

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2024**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Ribeiro, Vinícius Pereira Mello.

Efeito da rugosidade no transporte de sedimentos em escoamentos superficiais utilizando canal hidráulico / Vinícius Pereira Mello Ribeiro. - Poços de Caldas, MG, 2024.

58 f. : il. -

Orientador(a): Alexandre Silveira.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2024.  
Bibliografia.

1. Drenagem urbana. 2. Escoamento superficial. 3. Hidrologia. 4. Hidráulica. I. Silveira, Alexandre, orient. II. Título.

## VINÍCIUS PEREIRA MELLO RIBEIRO

### Efeito da rugosidade no transporte de sedimentos em escoamentos superficiais utilizando canal hidráulico

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Aprovada em: 29 de janeiro de 2024.

Prof. Dr. Alexandre Silveira  
Presidente da Banca Examinadora  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Flávio Aparecido Gonçalves  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Davidson de Oliveira França Júnior  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Silveira, Professor do Magistério Superior**, em 04/03/2024, às 16:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifalmg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifalmg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1176836** e o código CRC **D93E8B9A**.

Dedico este trabalho à Deus para sua honra e glória.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à Deus por ter me dado sabedoria e condições para poder concluir esta etapa da minha vida.

Agradeço ao meu orientador Alexandre Silveira, pela oportunidade dada e pelas orientações que agregaram muito à minha formação como mestre.

Agradeço à minha esposa Gabriela, minha mãe Cláudia, meu pai André e minha irmã Letícia pelo apoio dado durante a realização do trabalho e por me darem todo o incentivo para conseguir realizar este sonho de me tornar mestre.

Agradeço aos colegas Rogério e Lucas pelo apoio dado na realização dos experimentos e pela parceria e amizade desenvolvida durante o tempo do mestrado.

Agradeço às instituições parceiras que financiaram a pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do projeto APQ-02045-17 e da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), Campus Poços de Caldas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

## RESUMO

A urbanização acelerada e sem planejamento, altera o ciclo hidrológico urbano, causando grandes impactos como o aumento do transporte de sedimentos no escoamento superficial aumentando também os impactos econômicos, sociais e ambientais em áreas urbanas. Nos dias atuais, existe uma busca por soluções que minimizem os impactos causados pelo aumento da quantidade de sedimentos e do escoamento superficial em áreas urbanas. Além da necessidade de encontrar soluções para os problemas relacionados ao transporte de sedimentos no escoamento superficial, existem dificuldades para a realização de trabalhos em campo, que são, geralmente, trabalhosos, demandam muito esforço e são caros. Desta forma, a utilização de modelos em escala permite complementar os estudos sobre transporte de sedimentos no escoamento superficial, facilitando o controle de algumas variáveis de difícil controle em escalas reais, além de reduzir os custos e o tempo da pesquisa. Neste estudo foram realizados experimentos em escala reduzida em um canal hidráulico no laboratório da Universidade Federal de Alfenas para verificar o efeito da rugosidade no transporte de sedimentos no escoamento superficial. Os ensaios foram realizados em um canal de acrílico para duas rugosidades diferentes, em réplicas para três vazões diferentes que variavam de 0,15 a 0,25 L.s<sup>-1</sup> e foram utilizadas 25 gramas de sedimento por ensaio. Os resultados mostraram que as descargas mássicas de pico dos polutogramas foram muito menores para a rugosidade R2 do que com a rugosidade R1, onde houve uma diminuição de 98,09% na vazão Q1, 99,10% na vazão Q2 e 99,17% na vazão Q3. Ademais, a distribuição temporal dos sedimentos nos polutogramas foi muito menor para a rugosidade R1, onde grande parte da quantidade de sedimentos foi coletada em um intervalo muito pequeno de tempo, entre 12 e 30 segundos, e para a rugosidade R2 a quantidade de sedimentos foi distribuída em um intervalo de tempo muito maior. O estudo permitiu verificar que com o aumento da rugosidade do material de cobertura do canal houve uma diminuição significativa na descarga mássica de pico dos polutogramas e que a quantidade de sedimentos presentes no escoamento superficial diminuiu devido ao aumento de retenção de sedimentos causada pelo material com a maior rugosidade, mostrando que quanto maior a rugosidade do material de fundo do canal, maior será o tempo necessário para transportar toda a quantidade de sedimentos.

**Palavras-chave:** drenagem urbana; escoamento superficial; hidrologia; hidráulica.

## ABSTRACT

Accelerated and unplanned urbanization alters the urban hydrological cycle, causing major impacts such as increased sediment transport in surface runoff, also increasing economic, social and environmental impacts in urban areas. Nowadays, there is a search for solutions that minimize the impacts caused by the increase in the amount of sediment and surface runoff in urban areas. In addition to the need to find solutions to problems related to sediment transport in surface runoff, there are difficulties in carrying out work in the field, which is generally laborious, requires a lot of effort and is expensive. In this way, the use of scale models makes it possible to complement studies on sediment transport in surface runoff, facilitating the control of some variables that are difficult to control on real scales, in addition to reducing research costs and time. In this study, experiments were carried out on a reduced scale in a hydraulic channel in the laboratory of the Federal University of Alfnas to verify the effect of roughness on sediment transport in surface flow. The tests were carried out in an acrylic channel for two different roughnesses, in triplicates for three different flow rates that varied from 0.15 to 0.25 L.s<sup>-1</sup> and 25 grams of sediment were used per test. The results showed that the peak mass discharges of the pollutograms were much lower for the R2 roughness than for the R1 roughness, where there was a decrease of 98.09% in the Q1 flow, 99.10% in the Q2 flow and 99.17% at flow rate Q3. Furthermore, the temporal distribution of sediments in the pollutograms was much smaller for roughness R1, where a large part of the amount of sediment was collected in a very small interval of time, between 12 and 30 seconds, and for roughness R2 the amount of sediment was distributed over a much longer period of time. The study made it possible to verify that with the increase in the roughness of the channel covering material there was a significant decrease in the peak mass discharge of the pollutograms and that the amount of sediment present in the surface flow decreased due to the increase in sediment retention caused by the material with the greater roughness, showing that the greater the roughness of the channel bottom material, the longer it will take to transport the entire amount of sediment.

**Keywords:** urban drainage; surface runoff; hydrology; hydraulics.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – População urbana e rural no Brasil de 1950 a 2050.....	15
Figura 2 – Porcentagem de população em áreas urbanas por região.....	16
Figura 3 – Impactos da urbanização .....	17
Figura 4 – Hidrograma hipotético .....	17
Figura 5– Pilares dos projetos de SUDS .....	21
Figura 6 – Planta do sistema hidráulico do canal .....	27
Figura 7 – Rugosidades utilizadas .....	29
Figura 8 – Polutogramas para R1 .....	33
Figura 9 – Polutogramas para R2 .....	34
Figura 10 – Polutogramas médios de R1 e R2 .....	35
Figura 11 – Comparativo dos polutogramas médios .....	36
Figura 12 – Vazão de pico ( $Q_p$ ) x Tempo de pico ( $t_p$ ).....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Períodos de retorno de vazão em função da ocupação da área.....	19
Tabela 2 – Densidade mínima de equipamentos por área (áreas em km <sup>2</sup> por estação).....	22
Tabela 3 – Lista de materiais.....	28
Tabela 4 – Características dos ensaios .....	30
Tabela 5 – Redução dos picos de descarga mássica dos polutogramas médios.....	36

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	14
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1	INFLUÊNCIA DA URBANIZAÇÃO NA HIDROLOGIA URBANA .....	15
2.2	DRENAGEM URBANA.....	18
<b>2.2.1</b>	<b>Microdrenagem.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Macro drenagem.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Sistemas de drenagem urbana sustentável.....</b>	<b>20</b>
2.3	MÉTODOS DE MONITORAMENTO HIDROLÓGICO .....	21
2.4	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO AMBIENTE URBANO .....	23
2.5	ESTADO DA ARTE .....	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>27</b>
3.1	MATERIAIS .....	27
3.2	MÉTODOS.....	28
<b>3.2.1</b>	<b>Determinação das vazões .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Determinação das rugosidades utilizadas.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Coleta das amostras.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Filtragem das amostras .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Cálculo da carga de sedimentos .....</b>	<b>32</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>ARTIGO .....</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>42</b>
	<b>APÊNDICE A – Artigo enviado para publicação .....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural utilizado para os mais diversos usos como abastecimento público, irrigação, geração de energia, usos industriais, navegação, entre outros. Sabe-se que a água existe em abundância no planeta, entretanto, apenas uma parcela dessa quantidade de água está disponível para o homem. Aproximadamente 2,5% da água do mundo é doce, sendo que desta porcentagem, 30,1% são água subterrâneas e 68,7% são geleiras e cobertura de neve permanente (UNESCO, 2003).

A América do Sul é o continente onde se encontra a maior bacia hidrográfica do planeta. A bacia amazônica, de acordo com a Agência Nacional de Águas (2015), abrange uma área aproximada de 6 milhões de km<sup>2</sup> se estendendo por sete países e que, de acordo com Canales e Mendes (2011), concentra 8% da água doce superficial do planeta dentro da sua região geográfica.

No Brasil a disponibilidade de recursos hídricos é tratada com importância, pois se trata de um país com proporções continentais e um local onde são encontradas diversas bacias hidrográficas, se tornando um país com grande quantidade de água dentro em seu território. De acordo com Tundisi (2006), a quantidade de água no Brasil representa cerca de 53% da água existente na América do Sul. A água no Brasil é distribuída de forma não uniforme, sendo que alguns estados possuem mais e outros menos água disponível. Minas Gerais pode ser considerado um estado com grande quantidade de água, além de ser berço das nascentes de importantes rios que formam grandes bacias hidrográficas do país.

A água passou a ter um maior foco, não somente quanto à quantidade, mas também quanto à qualidade. Os problemas relacionados à qualidade da água estão relacionados às ações antropogênicas, que são fontes geradoras de poluentes, como a disposição de resíduos sólidos e líquidos de forma inadequada, resfriamento de água em termelétricas, construção de barragens e outros (Vasconcelos; Souza, 2011).

A urbanização se dá pelo aumento da população urbana em detrimento da população rural. Pode ocorrer, quando há a transferência de pessoas do meio rural para o urbano ou quando há aumento absoluto da população urbana fazendo com que a porcentagem da população aumente em relação à rural. Essa tendência intensificada do crescimento urbano vem causando um agravamento da qualidade de vida e do meio ambiente.

A falta de planejamento urbano com o crescimento acelerado das áreas urbanas gerou cidades mal estruturadas, onde a retirada considerável da vegetação natural, a cobertura do solo com materiais pouco permeáveis ou até impermeáveis, a ocupação de várzeas de rios e

estrangulamentos de leitos de rios, cortes e aterros nos terrenos para abrir ruas e desrespeitos às características topográficas e geológicas da região, acarretaram em problemas como inundações, enchentes e erosões. Além disso, o crescimento de população nas cidades em um curto intervalo de tempo também leva ao aumento da poluição, que é um fator que possui impacto direto na qualidade de vida da população das cidades.

A poluição, uma vez lançada no ambiente, se torna um problema grande e os impactos dos poluentes no escoamento superficial das cidades é um grande desafio para os pesquisadores e autoridades atualmente. Desde pequenas partículas, como micro plásticos, até sedimentos de tamanhos maiores, podem ser carregados no escoamento superficial decorrente de um evento de precipitação. Além disso, não somente sedimentos podem estar presente no escoamento, mas metais pesados como Cádmio e Níquel podem ser transportados e impactar a qualidade dos recursos hídricos (Silveira *et al.*, 2016).

Uma das indústrias que está diretamente ligada ao desenvolvimento urbano e é uma das maiores geradoras de resíduos no planeta é a construção civil. Os resíduos desta indústria, principalmente no Brasil, onde ainda predominam sistemas construtivos artesanais em alvenaria e concreto, que geram sedimentos como a areia e outros materiais de construção como entulhos que possuem dimensões pequenas e que são facilmente escoados durante eventos de chuva nas vias urbanas. Além disso, o processo de limpeza de lotes urbanos para que sejam construídos empreendimentos, onde serão construídas novas ruas, avenidas e rodovias são fatores que aumentam a quantidade de sedimentos dentro das bacias hidrográficas urbanas.

Uma vez que há uma enorme quantidade de resíduos que se depositam nas vias onde ocorre o escoamento superficial, ocorre também uma deterioração da qualidade das águas que escoam inicialmente nos sistemas de microdrenagem e que vão atingir os sistemas de macrodrenagem posteriormente. Esses sedimentos levados no escoamento superficial das áreas urbanas podem causar problemas de redução da capacidade de escoamento dos sistemas de drenagem e ocasionar problemas de inundações nas cidades. Além do problema ambiental, esse depósito de sedimentos dentro dos sistemas de drenagem gera um aumento do custo de manutenção dos sistemas de drenagem pois há o aumento na quantidade de vezes necessárias para se realizar os serviços manutenção de galerias de água pluvial e também de dragagem de canais.

Para que seja feito um planejamento e gestão eficaz dos recursos hídricos de uma determinada região é essencial conhecer a parcela de sedimentos que é transportada dentro de uma bacia hidrográfica até o seu exutório. Isso se deve ao fato de que os prejuízos causados pelos sedimentos estão intrinsecamente ligados à quantidade e à composição dessas partículas,

que são influenciadas pelos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos (Dotto, 2006, p.24).

Os estudos sobre o transporte de sedimentos no escoamento superficial em áreas urbanas podem ser realizados de diferentes formas, como estudos em campo, modelos físicos em escala piloto ou reduzidas e até a modelagem computacional. Os projetos realizados em campo, geralmente, são projetos trabalhosos e que demandam muito esforço para coleta de dados, pois é necessário que o pesquisador se locomova até o local e faça uso de equipamentos de elevado custo e manutenção. Isso faz com que este tipo de projeto se torne dispendioso financeiramente, sendo que o alto custo para realização de experimentos em campo muitas vezes acaba inviabilizando determinados projetos.

Dito isso, as dificuldades para a realização de trabalhos em campo são fatores importantes a serem considerados. De acordo com Quiles (2019), a falta de dados acarreta em dificuldades no desenvolvimento de pesquisas nas áreas do conhecimento como a hidrologia e climatologia, por exemplo. Lima (2017), destaca que em bacias hidrográficas urbanas, a dificuldade operacional, a imprevisibilidade da ocorrência ou não de precipitação e tamanho de área de controle, por exemplo, são fatores que dificultam o monitoramento em escala real.

Uma vez que estudos em campo são trabalhosos e caros, uma possibilidade alternativa é o uso de modelos em escalas piloto ou reduzidas, para estudar sobre escoamento superficial e transporte de sedimentos, como os modelos físicos em escala para simular escoamento. Isso posto, uma forma de complementar os estudos sobre transporte de sedimentos no escoamento superficial é a utilização de modelos em escala de laboratório, que permitem controlar algumas variáveis de difícil controle em escalas reais, além de reduzir os custos e o tempo da pesquisa, pois não demanda viagens a campo para coleta de amostras, sendo capaz de gerar resultados com menor custo e tempo.

Seguindo por esta linha de pesquisa, Felice (2017), afirma que em escalas de laboratório, há algum tempo que os modelos físicos e simuladores de chuva obtêm êxito no estudo do comportamento do processo de chuva-escoamento e, ultimamente, também têm obtido sucesso em trabalhos sobre a dinâmica do transporte de sedimentos e poluentes no escoamento superficial.

O estudo do transporte de sedimentos através do escoamento superficial urbano possui grande importância, visto que impactos ambientais, econômicos e sociais podem ser reduzidos, além de auxiliar o poder público em tomadas de decisão relacionadas ao planejamento urbano. Dessa forma, o tema proposto para este trabalho tem grande relevância, pois visa estudar como a rugosidade das superfícies onde ocorre o escoamento impacta no transporte de sedimentos,

utilizando experimentos em escala reduzida para verificar a quantidade de sedimentos que foi transportada.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o comportamento do transporte de sedimentos no escoamento superficial em um canal hidráulico.

### 1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Determinar as vazões a serem utilizadas no estudo;
- b) Determinar a granulometria de areia utilizada para aumentar a rugosidade do fundo do canal;
- c) Realizar o estudo experimental da quantidade de material transportado com a rugosidade do canal de acrílico em escala reduzida;
- d) Incorporar o aumento da rugosidade no canal;
- e) Verificar o efeito da variação da rugosidade no comportamento da quantidade de material transportado no escoamento superficial.

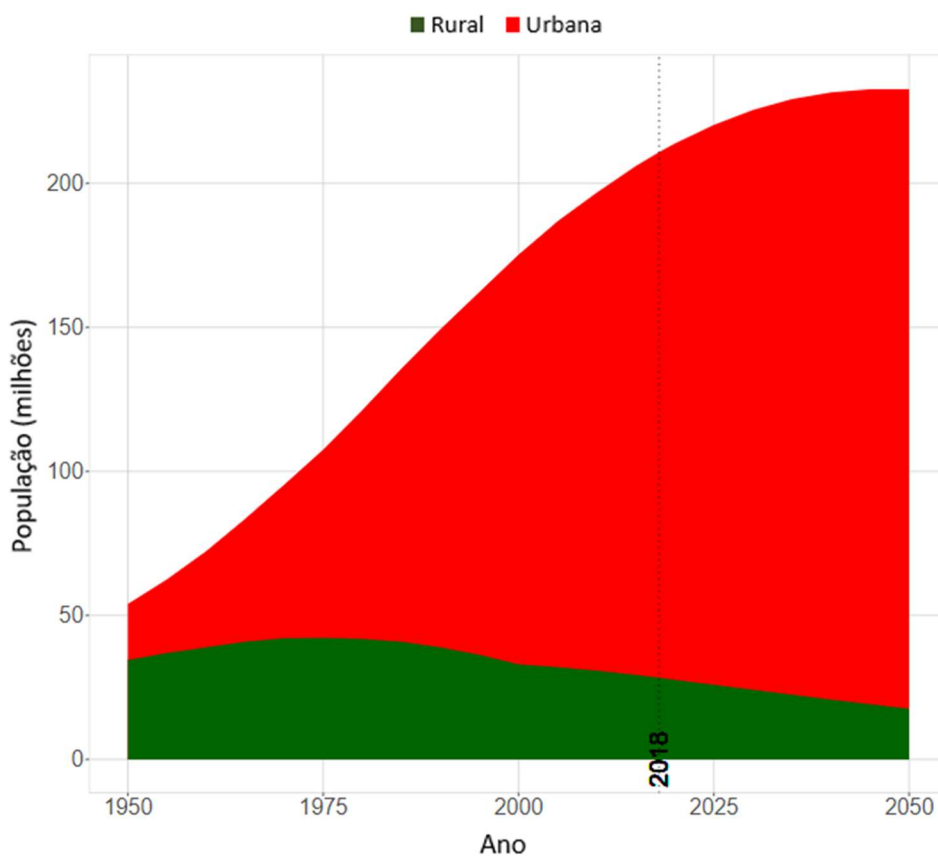
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INFLUÊNCIA DA URBANIZAÇÃO NA HIDROLOGIA URBANA

A urbanização é um processo que se dá com a migração de pessoas de áreas rurais para centros urbanos, ocasionando o aumento da população nestas áreas. Collodel (2009), define a urbanização como sendo o aumento da população urbana em detrimento da população rural, quando há a transferência de pessoas do meio rural para o urbano.

A Figura 1 apresenta um gráfico da quantidade de população nas áreas urbanas e rurais nas cidades do Brasil de 1950 e suas projeções até o ano de 2050.

Figura 1 – População urbana e rural no Brasil de 1950 a 2050



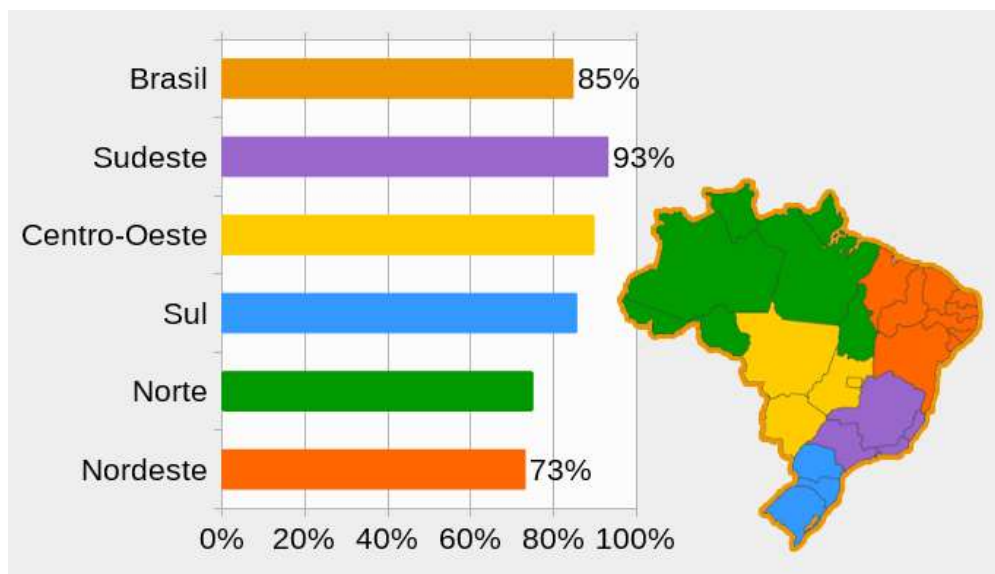
Fonte: Adaptado de ONU, *World Urbanization Prospects* (2018).

Analisando os dados é possível notar que, aproximadamente, a partir da década de 1970, a população brasileira passou a ter sua maioria nas áreas urbanas e esta tendência continua até os dias atuais. Além disso, as projeções mostram que a população que vive em áreas urbanas ainda continuará crescendo enquanto há um decréscimo da população nas áreas rurais.



Ora, não considerando dados apenas de projeções, mas também os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), segundo a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) 2015, 84,72% da população brasileira vive em áreas urbanas e 15,28% dos cidadãos brasileiros vivem em áreas rurais. O PNAD 2015 ainda cita a região Sudeste como sendo a que mais possui população nas áreas urbanas, com 93,14% da população da região, como mostra a Figura 2, onde está apresentado o gráfico de população por regiões brasileiras obtidos pelo PNAD 2015.

Figura 2 – Porcentagem de população em áreas urbanas por região



Fonte: IBGE, Pesquisa Nacional por amostra de Domicílios (PNAD) (2015).

Desde a revolução industrial é possível perceber o grande aumento da população urbana, que foi se acentuando cada vez mais nas últimas décadas. Essa migração de pessoas das áreas rurais para as áreas urbanas em busca de melhores empregos ou melhores condições de vida, fez com que houvessem grandes alterações nas condições naturais das bacias hidrográficas, ocasionando diversos problemas, como favelização, poluição, excesso de lixo e inundações.

A tendência intensificada do crescimento urbano vem causando um agravamento da qualidade de vida e do meio ambiente (Collodel, 2009). Diante disso, é possível afirmar que todo este crescimento de população nas cidades, em um curto espaço de tempo, levou ao aumento da poluição e problemas relacionados a inundações nas cidades.

As áreas urbanas sofrem muito devido à falta de planejamento e ocupação de áreas inundáveis antes da urbanização. Um exemplo de inundação e poluição devido aos problemas da urbanização no Brasil está apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Impactos da urbanização

a)



b)



Fontes: a) Guitarrara (2023a); b) Guitarrara (2023b).

Legenda: a) Inundação em área urbana

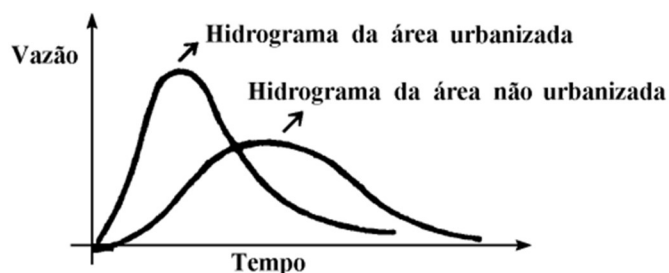
b) Poluição em área urbana

É muito comum ver nas cidades brasileiras casos relacionados a inundações nas épocas mais chuvosas do ano, principalmente em grandes centros urbanos, como São Paulo e Rio de Janeiro, onde a urbanização ocupou áreas de alagamento natural de leito de rios, aumentou a impermeabilização do solo para construção de estradas e edificações e, conseqüentemente, reduziu as áreas de absorção de água pelo solo. Isso leva ao aumento da quantidade de água escoada superficialmente, aumentando a vazão de pico dos hidrogramas nas áreas urbanas e adiantando o tempo em que esta vazão chega ao seu máximo, gerando todos os problemas oriundos das inundações.

Em bacias hidrográficas urbanas, as alterações causadas pela urbanização nas condições naturais de infiltração, topografia, cobertura vegetal e redes de drenagem naturais, modificam os processos de distribuição da água entre a superfície terrestre, subsolo e atmosfera (Canholi, 2013).

Os hidrogramas apresentados na Figura 4 mostram exatamente estes efeitos da urbanização de uma área no hidrograma.

Figura 4 – Hidrograma hipotético



Fonte: Tucci, Porto e Barros (1995, p.18).

É possível notar, nitidamente, que o pico de vazão é maior e atinge o seu valor máximo em um tempo menor, quando comparado a uma bacia hidrográfica não urbanizada. Isso ocorre pelo aumento da velocidade nas bacias hidrográficas urbanas devido à diminuição das áreas de infiltração de água no solo.

A ocorrência de inundações e cheias está ligado ao aumento de áreas impermeabilizadas nas regiões mais urbanizadas. Estes eventos têm ocorrido com uma maior frequência e estão associados a problemas nos sistemas de drenagem urbana, que são muitas vezes ineficientes ou subestimados, gerando uma preocupação para a sociedade (Seibt *et al.*, 2012).

## 2.2 DRENAGEM URBANA

Os problemas causados pela urbanização na hidrologia urbana devido à impermeabilização e alteração das características naturais das bacias hidrográficas, fizeram com o homem criasse diversas tecnologias para tentar controlar os problemas causados pelas chuvas nas cidades. Assim, temos os sistemas de drenagem urbana.

A drenagem urbana pode ser analisada como sendo constituída de dois grandes sistemas denominados microdrenagem e macrodrenagem.

### 2.2.1 Microdrenagem

A microdrenagem pode ser definida como “sistema de condutos pluviais a nível de loteamento ou de rede primária urbana” (Tucci; Porto; Barros, 1995). O sistema de microdrenagem tem como função coletar e conduzir a água da chuva através das redes primárias de drenagem. De acordo com Martins (2012), o sistema de microdrenagem pode ser composto pelos pavimentos, sarjetas, guias, bocas de lobo, galerias de drenagem, sistemas de retenção e infiltração nos lotes e diversos outros itens relacionados ao sistema viário, ou seja, a microdrenagem compreende tudo o que é construído para tornar viável o funcionamento do sistema viário de uma cidade.

De acordo com Tucci, Porto e Barros (1995), para obras de microdrenagem o período de retorno mais utilizado varia de dois a dez anos para uma determinada vazão, variando de acordo com a Tabela 1. Os mesmos valores foram propostos pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica e Companhia Ambiental de São Paulo (DAEE/CETESB) e são citados no caderno temático elaborado pela Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) (2016).

Tabela 1 – Períodos de retorno de vazão em função da ocupação da área

<b>Tipo de obra</b>	<b>Tipo de ocupação</b>	<b>Período de retorno (anos)</b>
Microdrenagem	Residencial	2
Microdrenagem	Comercial	5
Microdrenagem	Edifícios de serviços públicos	2 a 5
Microdrenagem	Aeroportos	5 a 10
Macro drenagem	Áreas comerciais e residenciais	50 a 100
Macro drenagem	Área de importância específica	500 ou mais

Fonte: Adaptado de Tucci, Porto e Barros (1995, p. 109).

### 2.2.2 Macro drenagem

A macro drenagem é formada pela rede de drenagem natural da bacia hidrográfica, ou seja, é constituída de rios e córregos, anteriores à urbanização. Outros elementos importantes da macro drenagem são as obras como canais, barragens, diques e outras, que complementam a rede de drenagem natural de uma bacia hidrográfica após o processo de urbanização.

Assim como na micro drenagem, os valores de períodos de retorno variam de acordo com a Tabela 1 apresentada anteriormente, onde as obras de áreas comerciais e residências podem variar de 50 a 100 anos e áreas de importância específica possuem um período de retorno de 500 anos ou mais.

O sistema de macro drenagem é projetado de forma interligada com o sistema de micro drenagem e é responsável por receber a água pluvial trazida pelo sistema de micro drenagem e conduzi-la até no seu trecho final de forma segura, a fim de minimizar os riscos de inundações nas áreas urbanas.

Para realizar o dimensionamento da macro drenagem, de acordo com Tucci, Porto e Barros (1995), devem ser considerados e delimitados todos os parâmetros envolvidos, que são:

- Vazão de projeto: para se definir a vazão de projeto de um canal é necessário associa-la a probabilidade de ocorrência de precipitação e, tradicionalmente são adotados períodos de retorno entre 10 a 100 anos, incluindo as variáveis relacionadas as incertezas hidrológicas e dimensionamento hidráulico.
- Diretrizes geométricas: no dimensionamento de um canal também é necessário considerar qual será a tipologia adotada para o dimensionamento, considerando as necessidades urbanas do local onde a obra será implantada e também as características hidráulicas da forma geométrica do canal.

- Desempenho e impactos ambientais: os impactos socioambientais causados pela introdução de uma obra no sistema de drenagem também devem ser levados em consideração. É necessário verificar quais os impactos da obra no local instalado, pois podem haver aumentos de vazão, redução de tempo de concentração, aumento de transporte de sedimentos e outros. Além disso, uma obra de grande porte, como um canal, necessita da desapropriação de áreas onde há população residente, e desocupação de margens e áreas degradadas.

### 2.2.3 Sistemas de drenagem urbana sustentável

Além dos sistemas de macro e microdrenagem tratados anteriormente, que podem ser denominados sistemas de drenagem convencional, ainda podemos acrescentar uma subdivisão denominada de sistemas de drenagem urbana sustentável (SUDS), quando levamos em consideração os efeitos da urbanização no meio ambiente.

É comum citar o aumento do volume de água escoada superficialmente e o transporte de sedimentos como sendo uns dos principais pontos a serem mitigados, no que diz respeito aos recursos hídricos dentro de áreas urbanas.

Assim, na tentativa de resolver estes problemas de drenagem urbana, foram criadas técnicas alternativas de drenagem sustentável e que receberam várias nomenclaturas ao redor do planeta como *Best Management Practices* (BMP), *Low Impact Development* (LID), *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) e *Green Infrastructure* (GI) (Gutierrez; Ramos, 2017). Neste trabalho vamos utilizar a nomenclatura de *Sustainable Urban Drainage Systems*, ou, na sua tradução, sistemas de drenagem urbana sustentável (SuDS) para tratar do tema.

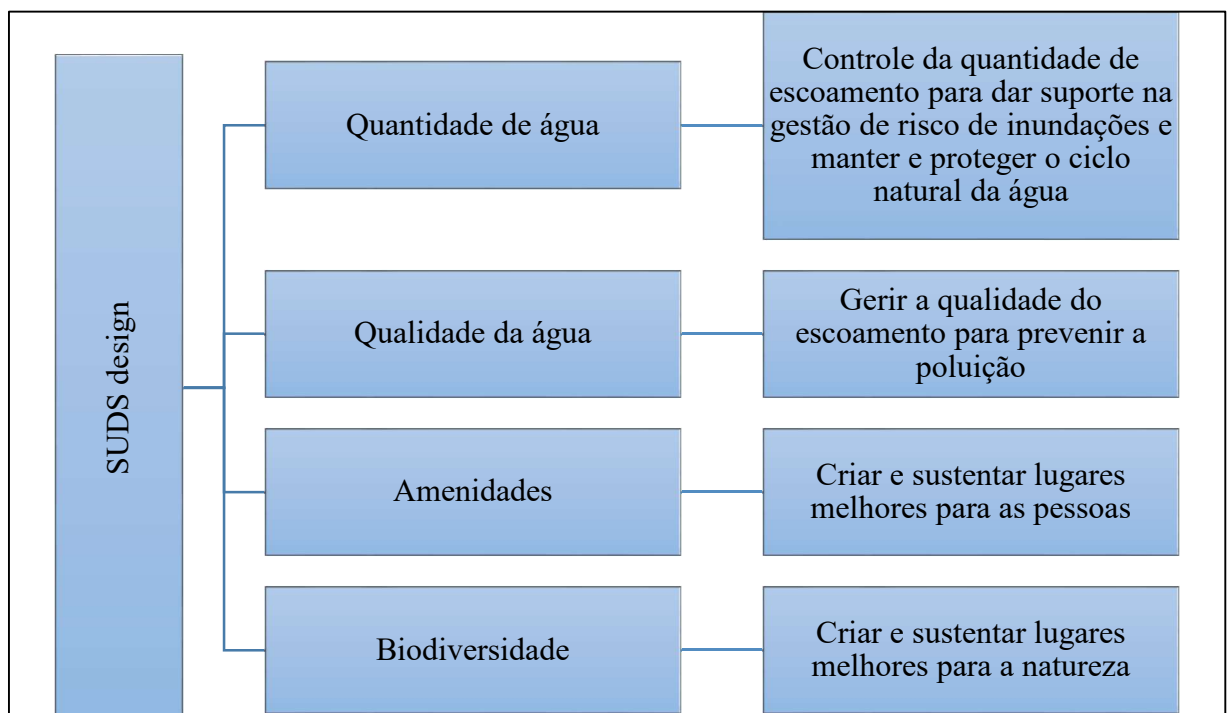
Segundo Mora-Melià *et al.* (2018), os SUDS são incorporados nos sistemas de drenagem urbana com uma forma de aumentar a performance e também a sustentabilidade dos sistemas de drenagem no desenvolvimento de áreas urbanas. Almeida (2020, p.16) apresenta os SUDS como um conjunto de técnicas sustentáveis de gestão e controle de águas pluviais que são uma alternativa à drenagem urbana convencional e que são utilizadas para minimizar os impactos devidos ao escoamento superficial e para atuar no gerenciamento de riscos de área suscetíveis a alagamentos onde foram implantados além de ajudar na preservação da bacia hidrográfica.

Os SUDS podem ser projetados de diversas formas diferentes, podendo ter componentes variados que, quando combinados, ajudam a atingir os parâmetros de projeto necessários para

determinada área. Em geral, os SUDS são projetados para fazer com que água da chuva seja gerenciada e usada próxima dos locais onde ela precipita, na superfície e utilizando vegetação, tendendo a fornecer os maiores benefícios (Ballard *et al.*, 2015). Ainda de acordo com os mesmos autores, os princípios utilizados para se projetar SUDS podem ser divididos em quatro principais pilares sendo: quantidade de água, qualidade da água, amenidade e biodiversidade. Através o uso de SUDS diversos objetivos podem ser atingidos na drenagem urbana como a melhora da qualidade da água escoada, suporte para gestão de riscos de inundação, melhora dos ambientes para as pessoas e para a natureza.

Ballard *et al.* (2015) apresentaram um quadro resumo destes pilares de projeto de SUDS como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5– Pilares dos projetos de SUDS



Fonte: Adaptado de Ballard *et al.* (2015, p.6).

### 2.3 MÉTODOS DE MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

Na hidrologia os parâmetros utilizados em estudos podem ser de origem climática como precipitação, evapotranspiração e temperatura, podem ter origem características do meio receptor como, por exemplo, geologia, topografia e urbanização ou podem ser relacionados ao escoamento como as descargas líquidas e sólidas, características da rede de drenagem, e velocidade e qualidade da água e dos sedimentos que são transportados (Tucci, 2001. p. 485).

É necessário levar em consideração que a obtenção de dados hidrológicos de qualidade é algo consideravelmente difícil quando levamos em consideração todas as variáveis envolvidas. Diante disso, foram desenvolvidas formas de coleta de dados de monitoramento hidrológico com o intuito de monitorar as bacias hidrográficas para melhorar a qualidade dos dados obtidos.

Existem instrumentos como pluviógrafos e pluviômetros que são utilizados como instrumentos de aquisição de dados pluviométricos pontuais. A diferença entre estes dois equipamentos é que o pluviógrafos possui a capacidade de registrar dados automaticamente e não necessita de leituras manuais como ocorre com o pluviômetro (Tucci, 2001, p.491).

Para que a coleta de dados seja eficiente há a necessidade de se dimensionar a quantidade mínima de equipamentos utilizados para a coleta em uma determinada área, ou seja, é necessária uma densidade mínima de equipamentos para garantir que haja uma boa qualidade na coleta de dados.

A *World Meteorological Organization* (WMO) (2008), em seu guia de práticas hidrológicas, recomendam as densidades mínimas de equipamentos por área de acordo com as diferentes áreas climáticas e geográficas como pode ser visto na Tabela 2, onde o pluviômetro convencional é aquele armazena uma quantidade de chuva e a medição ocorre por anotações manuais e o pluviógrafo automático mede e armazena as informações sobre a quantidade de chuva precipitada de forma automática, podendo ser utilizados os tipos que mais se adequarem a região em estudo.

Tabela 2 – Densidade mínima de equipamentos por área (áreas em km<sup>2</sup> por estação)

Unidade fisiográfica	Precipitação	
	Pluviômetro Convencional	Pluviógrafo Automático
Litoral	900	9.000
Montanhas	250	2.500
Planícies interiores	575	5.750
Áreas montanhosas/onduladas	575	5.750
Pequenas ilhas	25	250
Áreas urbanas	–	10 a 20
Áreas áridas e polares	10.000	100.000

Fonte: Adaptado de WMO (2008, p. 48).

É interessante notar que a densidade recomendada de equipamentos em áreas urbanas é grande devido à importância do monitoramento destas áreas e também pela maior facilidade de

instalação de equipamentos quando comparadas em áreas áridas e polares onde a densidade é muito menor porque há uma dificuldade de instalação e manutenção destes equipamentos.

O monitoramento hidrológico em rios é um instrumento valioso para a gestão sustentável dos recursos hídricos dentro das bacias hidrográficas. O monitoramento das vazões em rios é outro fator importante a ser avaliado no monitoramento hidrológico e pode ser realizado de diversas formas. Como Carvalho (2008) cita em seu artigo, podem ser utilizados métodos indiretos ou automáticos, que pode ser um objeto flutuante simples que é lançado na superfície da água e utilizado para estimar a velocidade através da distância que percorre em determinado tempo e também podem ser utilizados métodos que possuem uma precisão muito maior como os molinetes, *doppler* acústicos (ADCP – *Automatic Doppler Current Profiler*) e até satélites podem ser utilizados em alguns casos.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) é a responsável pela coordenação das atividades da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) em todo o território brasileiro e possuem milhares de estações para monitorar volumes de precipitação, níveis e vazões dos mananciais superficiais, quantidade de sedimentos, evaporação e a qualidade das águas (Almeida, 2020, p.26). No sistema Hidroweb, é possível verificar que existem atualmente mais de 23 mil estações pluviométricas e fluviométricas cadastradas, para realizar o monitoramento hidrológico no país (Brasil, 2023).

Apesar de ainda existirem bacias hidrográficas menores onde não há muitos dados hidrológicos disponíveis, a importância do monitoramento hidrológico dentro das bacias hidrográficas é inegável. Com uma maior quantidade e qualidade de dados disponíveis é possível melhorar a capacidade de análise de dados dos estudos hidrológicos e aumentar de forma significativa a qualidade dos estudos realizados na área de hidrologia e de transporte de sedimentos.

## 2.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO AMBIENTE URBANO

É indiscutível que o crescimento populacional possui impacto muito grande na produção de sedimentos que podem ser carregados no escoamento superficial dos centros urbanos. Esse aumento de sedimentos oriundos de fontes antropogênicas é consideravelmente alto nos meios urbanos, o que causa um grande impacto nos sistemas de drenagem urbanos e, conseqüentemente, afeta a qualidade do escoamento superficial. Para Felice (2017) os processos erosivos devidos à ocupação e expansão desordenada causam enormes prejuízos ao ecossistema natural. A intensidade e forma com que eles ocorrem variam de acordo com as



características do solo, assim a erosão passou a ser reconhecida como antrópica ou acelerada, deixando de ser um processo totalmente natural. Kiat *et al.* (2008) dizem que uma rápida urbanização possui um impacto acelerado na hidrologia da bacia hidrográfica e sua geomorfologia. Esse desenvolvimento que ocorre nas áreas da bacia hidrográfica leva a um aumento do transporte de sedimentos devido ao aumento drástico que ocorre no escoamento superficial.

É imprescindível entender os fenômenos relacionados ao transporte de sedimentos em ambientes urbanos. Existe uma complexidade e pouco entendimento acerca do transporte de sedimentos e o caminho que este tipo de poluente percorre da sua fonte até os corpos hídricos receptores (Lima, 2017). Compreender os fenômenos que estão relacionados ao transporte de sedimentos é importante para que se possa prever o comportamento do transporte de sedimentos e contaminantes em redes de águas superficiais. Devido aos seus efeitos negativos, o transporte de sedimentos é considerado um processo crítico em muitos sistemas hidrotécnicos e ambientais (Visescu; Beilicci; Beilicci, 2016).

Outro ponto importante a mencionar sobre os sedimentos é quanto a sua fonte. Existem inúmeras fontes de sedimentos que podem ser carregados no escoamento superficial. Os sedimentos presentes no meio ambiente não somente podem ter fontes não naturais como indústrias, esgotos e até mesmo na construção civil, mas como também podem ter origem natural como, por exemplo, na erosão de solos.

Os esgotos domésticos e industriais não são a única fonte de poluição dos corpos hídricos. Parte desta poluição é proveniente do escoamento superficial de grandes centros urbanos (Pessoti, 2018). As fontes de sedimentos podem ter origens naturais como, por exemplo, erosão eólica, erosão causadas pela chuva, erosão de riachos, escoamento de águas pluviais e erosão de margens, ou origem antropogênica, onde os exemplos podem ser descarga de águas residuais, lavouras, construção civil e mineração. Assim, os sedimentos podem servir como meio de transporte para pesticidas, materiais radioativos e nutrientes gerando problemas de qualidade da água (Kalin; Hantush, 2003).

É possível notar a importância de se realizarem mais estudos sobre o transporte de sedimentos no escoamento superficial urbano para que possam ser entendidos quais características o influenciam. Outro ponto que justifica o estudo do transporte de sedimentos em áreas urbanas é a possibilidade de se proporem melhorias para os sistemas de drenagem existentes e até mesmo criar novos métodos de drenagem, o que pode levar a gerar uma modernização nos sistemas hidráulicos de drenagem existentes, o que conseqüentemente melhoraria a qualidade da água escoada das cidades para os corpos hídricos.

## 2.5 ESTADO DA ARTE

O transporte de sedimentos no escoamento superficial de áreas urbanas é um tema complexo e ainda carece de estudos para aumentar o grau de entendimento sobre o fenômeno. Há uma grande quantidade de estudos sobre transporte de sedimentos em rios e canais em escala real e modelagens computacionais, que utilizam dados coletados em experimentos em rios e canais para calibragem dos modelos. Entretanto, estudos que analisam a rugosidade do canal utilizando modelos em canais com escala reduzida ainda não são escassos, sendo mais comuns trabalhos em escalas maiores.

Um exemplo é o trabalho de Juliana (2021), que utilizou uma chuva simulada para estudar qual a influência da intensidade de chuva, da posição onde microplásticos estão localizados na superfície e da sua dimensão no transporte de microplásticos pelo escoamento urbano. Para isso a autora utilizou 12 cenários diferentes na realização dos experimentos e foram obtidos polutogramas que avaliaram qual a influência das variáveis estudadas. Os resultados obtidos pela autora mostraram que todas as variáveis estudadas possuíam influência no transporte de microplásticos no escoamento superficial.

Moruzzi *et al.* (2017) também possuem um estudo relacionado, onde avaliaram qual o desempenho de um canal gramado, em escala real, na remoção de materiais suspensos que estão presentes no escoamento superficial. Os autores utilizaram um canal com 100 m de comprimento e de declividade igual a 2%. Foram utilizadas diferentes concentrações de material particulado que era descarregado por meio de chuvas simuladas. A quantidade de sólidos suspensos totais (SST) foi medida em posições diferentes ao longo do canal e os hidrogramas de descarregamento e as lâminas de água no canal foram monitorados durante a passagem da onda de cheia. Os resultados obtidos no estudo mostraram que a extensão do canal está fortemente ligada à remoção de material particulado no escoamento superficial. Além disso, o processo é influenciado pelos aspectos dinâmicos decorrentes da passagem da onda de cheia.

Felice (2017) estudou experimentalmente, em escala reduzida, o transporte de poluentes que tem origem de uma fonte difusa, variando a posição da fonte poluidora em relação ao exutório de uma superfície impermeável e também a forma dos poluentes, considerando duas poluentes em suspensão, utilizando areia fina e poluentes dissolvidos, utilizando cloreto de sódio. A autora utilizou um simulador de chuva sobre uma superfície acrílica impermeável com 8,40 m<sup>2</sup> de área, dividindo a área em quatro posições, onde foram distribuídos a areia fina e o cloreto de sódio. Os resultados mostraram que o transporte de material dissolvido apresenta

valores maiores de pico de descarga mássica e um tempo menor para atingir esses valores, quando comparados aos poluentes em suspensão. A autora também avaliou o efeito do *first flush*, onde descreveu que ele ocorreu para todas as posições quando ensaiado o transporte de cloreto de sódio e apenas nas posições mais próximas do exutório da superfície impermeável apresentaram o fenômeno no transporte da areia fina. Devido à proximidade do transporte de poluentes suspensos e dissolvidos nas regiões mais próximas do exutório, a autora concluiu que eles são influenciados pela energia do fluxo do escoamento, que foi capaz de remover as partículas depositadas na superfície impermeável.

Lima (2017) estudou a influência da densidade de ocupação no transporte de um material solúvel e no escoamento superficial urbano. Foi utilizando um modelo em escala reduzida de um simulador de chuva com intensidade de  $43\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  instalado sobre uma superfície impermeável, com blocos colocados sobre a superfície para simular a ocupação urbana. O autor variou a posição do poluente e a densidade de ocupação para avaliar diferentes cenários, utilizando como variáveis dependentes o tempo inicial e final do transporte, tempo em que foi atingido o pico do polutograma, valor de pico e massa transportada e como variáveis independentes a posição do poluente em relação ao exutório e a densidade de ocupação. Lima (2017) concluiu que a posição do poluente possui influência em todas as variáveis analisadas, o tempo final de transporte não foi influenciado pela densidade de ocupação, o tempo de início do hidrograma é influenciado pela presença de blocos e que para as densidades examinadas, a densidade de ocupação foi insignificante.

É indiscutível a importância de se entender quais os comportamentos e as variáveis que influenciam o transporte de sedimentos em ambientes urbanos e, devido à essa pouca quantidade de estudos relacionados aos sedimentos urbanos em escala reduzida, este trabalho se mostra promissor e inovador com relação a metodologia utilizada.

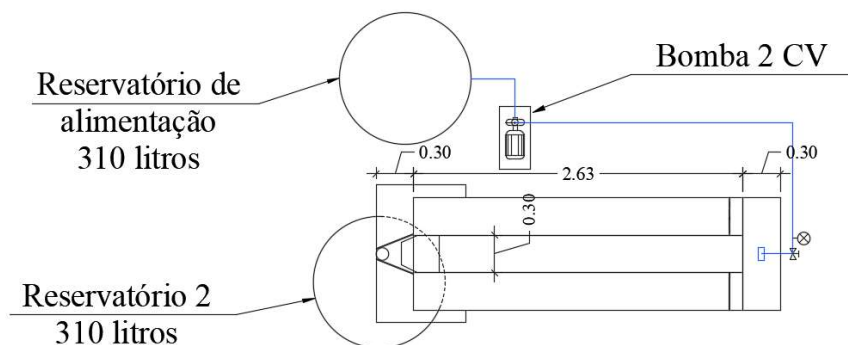
### 3 METODOLOGIA

Este trabalho utilizou como método uma pesquisa experimental, para manipulação direta das variáveis relacionadas ao objeto de estudo. O estudo foi realizado no laboratório de hidrologia da Universidade federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, MG.

#### 3.1 MATERIAIS

Foi utilizado neste trabalho o canal hidráulico do laboratório de hidrologia que é composto de um canal construído com material acrílico, totalmente impermeabilizado e liso, dividido em três canais de 30 cm de largura. O simulador também conta com um sistema de bombeamento de água que é composto por um reservatório de 310 litros que serve de fonte de alimentação para o sistema e uma bomba com potência de 2CV, que bombeia a água através de uma tubulação de diâmetro de 3/4" para o canal. O sistema possui um registro para controle da vazão de água no sistema do simulador. Para proteger o sistema de bombeamento dos sedimentos utilizados, a água escoada não é recirculada e é coletada por outro reservatório de 310 litros, onde os sedimentos decantam e somente a água é direcionada para o sistema hidrossanitário da Universidade Federal de Alfenas, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Planta do sistema hidráulico do canal



Legenda:



Fonte: Autor (2023).

Para determinação das vazões a serem utilizadas no trabalho foram utilizados 3 recipientes plásticos com volume de 1 litro, um cronômetro e uma balança digital.

Na coleta das amostras foram utilizados recipientes plásticos com 1 litro de volume e um cronômetro e areia como sedimento.

Após a coleta das amostras foi realizado o processo de secagem e filtração das amostras para determinar a quantidade de material transportado no escoamento. Para isso, foram utilizadas uma estufa, um sistema de filtração a vácuo, placas de Petri e filtros de fibra de vidro.

As quantidades de materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Lista de materiais

Item	Quantidade
Recipientes plásticos com volume de 1 litro	60 un.
Balança digital	2 un.
Cronômetro	1 un.
Estufa	1 un.
Sistema de filtração à vácuo	1 un.
Placas de Petri	60 un.
Areia	2 kg
Filtros de fibra de vidro	180 un.

Fonte: Autor (2023).

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Determinação das vazões

O primeiro passo foi determinar a vazão através do método volumétrico. Foram utilizados 3 recipientes de volume igual a 1 litro, que foram previamente pesados, secos e vazios, para determinar sua massa. Realizado este procedimento, o sistema de bombeamento do canal foi ligado para iniciar as coletas de amostras de água e a vazão foi regulada através do registro de gaveta na entrada do reservatório do canal. Foram coletadas 3 amostras e o tempo de coleta foi cronometrado. Logo após a coleta de cada amostra, os recipientes foram pesados para determinar a massa de água coletada e a vazão foi calculada utilizando a Equação 1.

$$Q = \frac{Vol.}{\Delta t} \quad (1)$$

Onde:

Q – Vazão,  $L.s^{-1}$ ;

Vol. – Volume de água coletada, em litros;

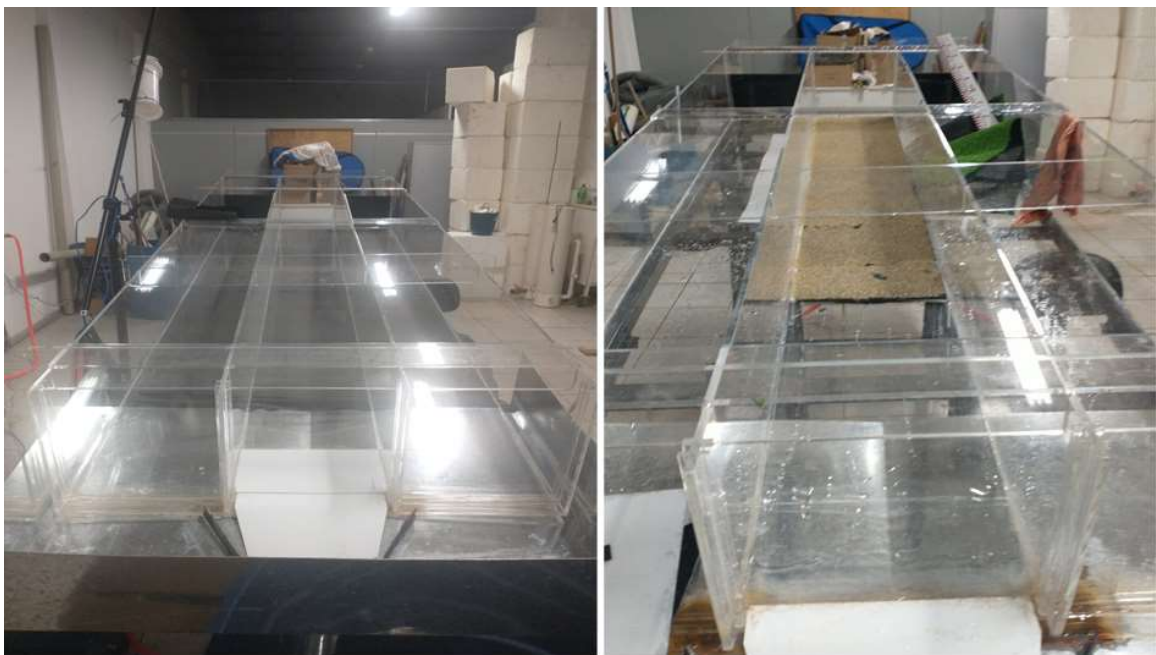
$\Delta t$  – Tempo da coleta, em segundos;

Após o cálculo da vazão de cada ensaio, foi determinada a vazão média através de média aritmética dos valores obtidos para cada vazão e foram escolhidas as vazões médias iguais a 0,15, 0,20 e 0,25  $L.s^{-1}$ . A determinação das vazões a serem utilizadas no trabalho foi feita através do método de tentativa e erro para poder encontrar as vazões onde foi possível trabalhar a coleta de sedimentos de maneira manual.

### 3.2.2 Determinação das rugosidades utilizadas

O objetivo do trabalho era estudar o efeito do aumento de rugosidade no transporte de sedimentos. Então, após a determinação das vazões foi realizada preparação do canal para utilizar que pudessem ser realizados ensaios com duas rugosidades diferentes no canal como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Rugosidades utilizadas



Fonte: Autor (2023).

Legenda: a) Canal sem areia (Rugosidade R1)

b) Canal com areia (Rugosidade R2)

Foi determinado que seriam utilizadas duas rugosidades: R1, a rugosidade do acrílico do canal e R2, de uma placa de acrílico de, aproximadamente 1,90m, com areia de granulometria entre 1,18 mm e 2,0 mm, colada com silicone sobre ela. Esta placa era removível para que pudessem ser realizadas limpezas e manutenções no canal.

Para determinação da granulometria da areia utilizada, foi feito um peneiramento de 2 quilos de areia e escolhida a faixa granulométrica a ser utilizada.

A inclinação do canal foi mantida constante durante os ensaios sendo igual a 12,17%.

### 3.2.3 Coleta das amostras

Determinadas as vazões e as rugosidades, os ensaios foram realizados em tréplicas para as três vazões diferentes, variando de 0,15 a 0,25 L.s<sup>-1</sup> e foram utilizadas 25 gramas de sedimento por ensaio, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Características dos ensaios

Nº do ensaio	ID da Vazão	Q <sub>méd</sub> [L.s <sup>-1</sup> ]	Rugosidade	Massa de sedimento [g]
1				
2	Q1	0,15	R1	
3				
4				
5	Q2	0,20	R1	
6				
7				
8	Q3	0,25	R1	
9				
10				25
11	Q1	0,15	R2	
12				
13				
14	Q2	0,20	R2	
15				
16				
17	Q3	0,25	R2	
18				

Fonte: Autor (2023).

Após a regulagem do sistema para a primeira vazão, o sistema de bombeamento era ligado e aguardava-se alguns segundos para que a vazão se estabilizasse. Então, os sedimentos eram colocados no início do canal e o cronometro era iniciado. A partir deste momento, iniciou-

se a coleta das amostras manualmente no exutório do canal, utilizando-se os recipientes plásticos com volume de um litro e foram coletadas 10 amostras em cada ensaio.

Para a rugosidade R1, o tempo de coleta foi de três segundos com três segundos de intervalo entre as coletas para a vazão Q1 e para as vazões Q2 e Q3 as coletas foram feitas durante dois segundos com um intervalo entre coletas de dois segundos. A diminuição do tempo de coleta e o intervalo entre coletas nas vazões Q2 e Q3 foi necessária para que pudessem ser encontrados sedimentos em todas as amostras.

Realizadas todas as coletas para a vazão Q1, os recipientes eram levados para o laboratório de química da Universidade Federal de Alfenas, Campus Poços de Caldas, onde era realizado o processo de filtração das amostras conforme descrito em 3.2.4. O mesmo procedimento foi realizado para as vazões Q2 e Q3.

Finalizados os experimentos com a rugosidade R1, a placa com areia foi colocada dentro do canal para o início dos experimentos com a segunda rugosidade.

Para a rugosidade R2 as coletas foram de três segundos com sete segundos de intervalo entre as coletas para todas as vazões. Para a vazão Q1 as coletas se iniciaram a partir do instante  $t = 60$  segundos, para Q2 em  $t = 45$  segundos e para Q3 em  $t = 15$  segundos. Estas diferenças entre o início do teste para cada vazão na rugosidade R2 se deram pelo fato de a placa com areia segurar muito os sedimentos durante o escoamento para vazões mais baixas. Então, houve a necessidade de ajustar o início da coleta para que todas as amostras contivessem sedimentos.

### **3.2.4 Filtração das amostras**

Depois da coleta das amostras de cada ensaio, foi realizado o processo de filtração, onde foram utilizados os filtros de fibra de vidro, que eram secos em estufa por 24 horas à  $103^{\circ}\text{C}$  antes de iniciar o processo de filtração.

Após a secagem dos filtros, os mesmos foram retirados da estufa e colocados em dessecadores para atingir a temperatura ambiente. Após o resfriamento, os filtros eram pesados para obter sua massa sem os sedimentos.

Para o processo de filtração das amostras foi utilizado o sistema de filtração à vácuo, onde o papel de filtro foi colocado no centro do suporte do filtro e a bomba a vácuo foi ligada. A amostra foi homogeneizada no frasco, vertida sobre o filtro e as paredes do recipiente foram lavadas com água destilada para minimizar a perda de sedimentos no processo de filtração. Os filtros foram cuidadosamente removidos com uma pinça e transferidos para os seus respectivos recipientes identificados. Após este processo as amostras foram secadas em estufa a  $103^{\circ}\text{C}$  por



24 horas, retiradas e colocadas em dessecador para atingir a temperatura ambiente e, por fim, as amostras foram pesadas para obter a massa de sedimento.

### 3.2.5 Cálculo da carga de sedimentos

Com os dados coletados após o processo de filtração, foi possível calcular a quantidade de sólidos suspensos totais (SST) através da Equação 2.

$$SST = \frac{(M_2 - M_1) \times 1000}{V} \quad (2)$$

Onde:

SST – Sólidos suspensos totais, em g.L<sup>-1</sup>;

M<sub>1</sub> – Massa do conjunto filtro + placa de petri secos e sem sedimentos, em gramas;

M<sub>2</sub> – Massa do conjunto filtro + placa de petri secos e com sedimentos, em gramas;

V – Volume da amostra, em mL;

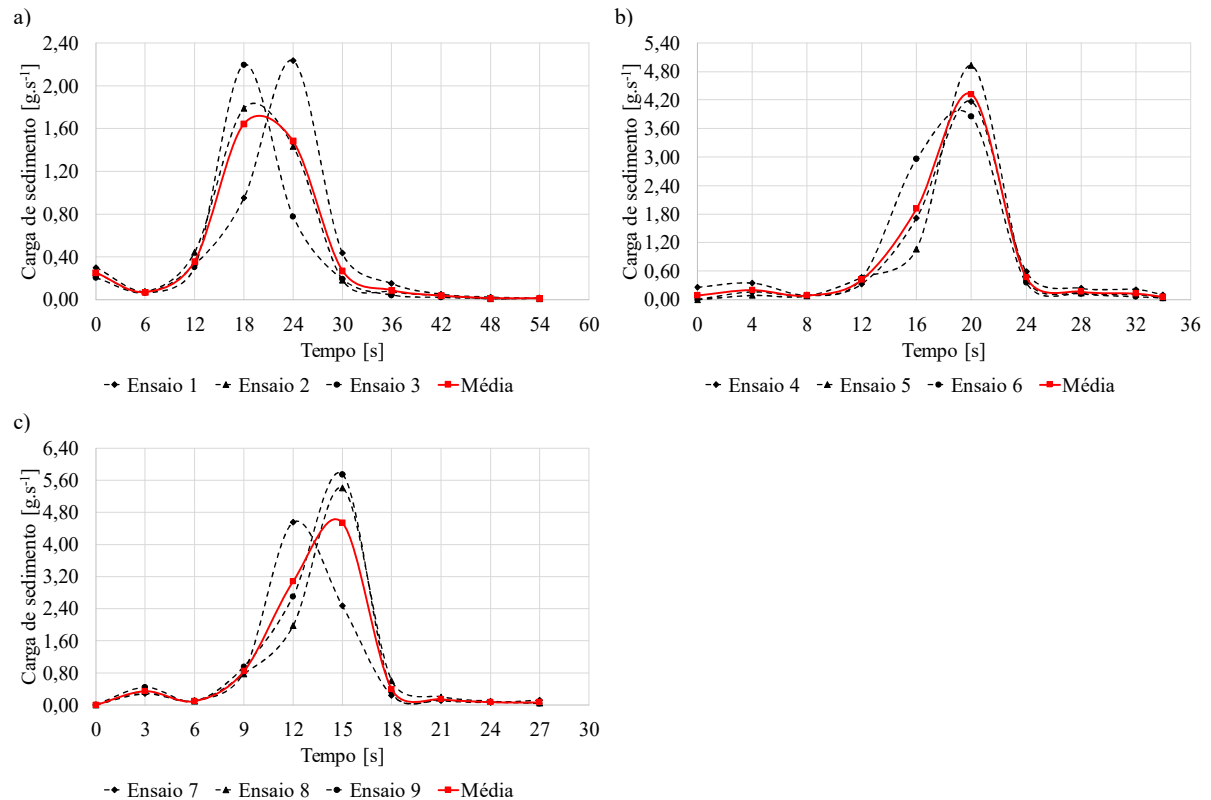
Para a construção dos polutogramas foi necessário calcular a carga de sedimentos, que é dada pela multiplicação dos valores de SST, em g.L<sup>-1</sup>, pela vazão média do escoamento, em L.s<sup>-1</sup> obtendo assim a carga de sedimentos em g.s<sup>-1</sup>.

Todos os cálculos e polutogramas foram realizados com o auxílio de planilhas eletrônicas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os polutogramas obtidos nos ensaios com a rugosidade inicial (R1) do canal estão apresentados na Figura 8.

Figura 8 – Polutogramas para R1



Fonte: Autor (2023).

Legenda: a) Q1

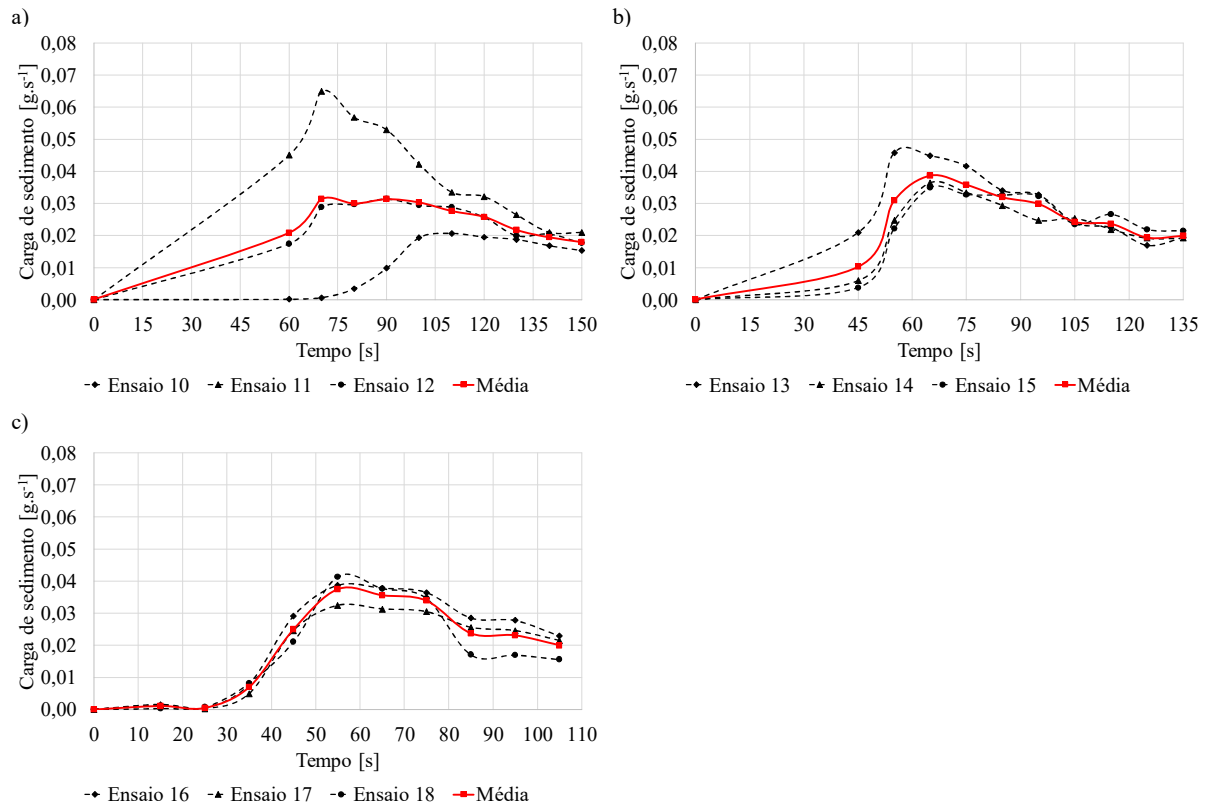
b) Q2

c) Q3

Para a vazão de  $0,15 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ , o pico do polutograma ocorre entre 18 e 24 segundos e o maior valor encontrado foi de  $2,23 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$  no primeiro ensaio. No ensaio com a vazão Q2, houve um aumento da vazão de  $0,15$  para  $0,20 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  e o pico da carga de sedimento ocorreu entre os segundos 16 e 20. O maior valor encontrado para a carga de sedimento com esta vazão ocorreu no ensaio número 5 com o valor de  $4,93 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ . Para a vazão Q3, de valor igual a  $0,25 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ , o maior valor encontrado foi de  $5,74 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$  no ensaio número 9 e os picos dos polutogramas ocorreram entre os segundos 12 e 15.

A Figura 9 apresenta os polutogramas com os resultados dos ensaios da segunda etapa do experimento, onde foi utilizada a maior rugosidade (R2).

Figura 9 – Polutogramas para R2



Fonte: Autor (2023).

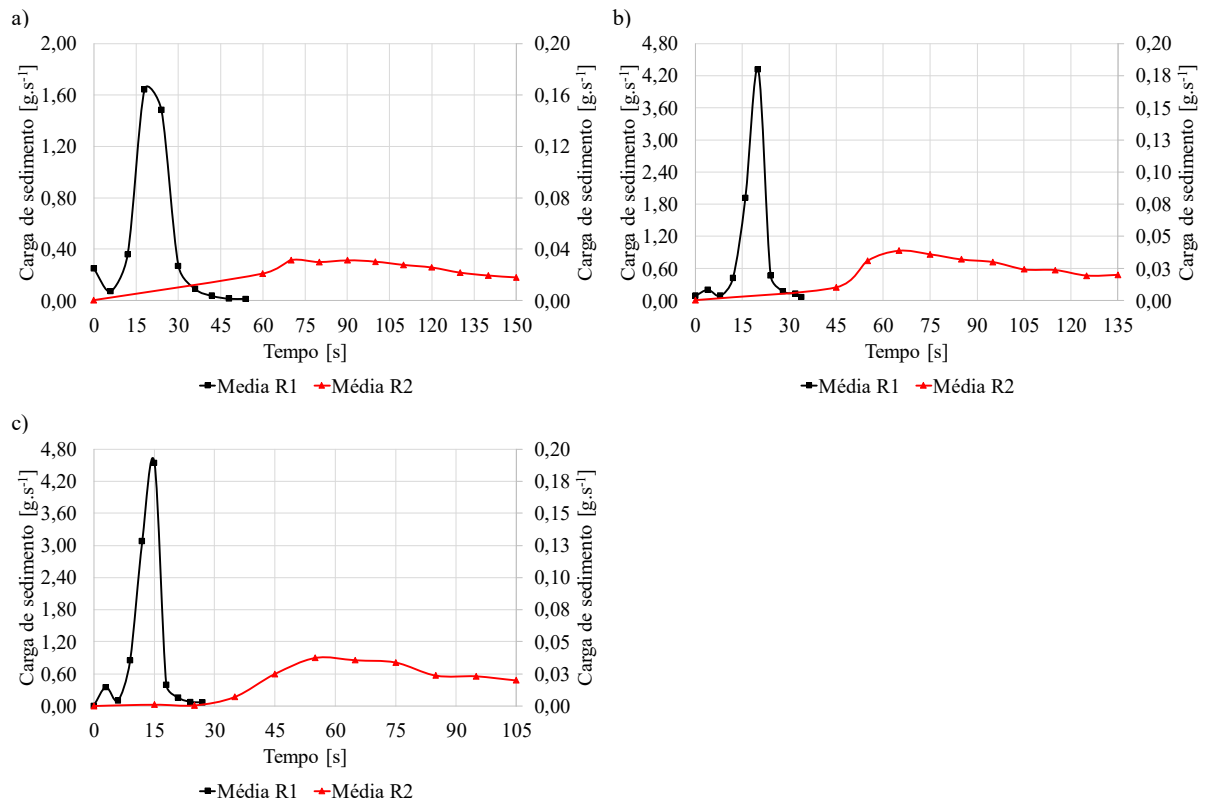
Legenda: a) Q1  
b) Q2  
c) Q3

Para a vazão Q1, o pico de vazão médio teve um valor de  $0,031 \text{ g.s}^{-1}$  aos 90 segundos e para a vazão Q2 o pico ocorreu aos 65 segundos com um valor máximo igual a  $0,039 \text{ g.s}^{-1}$ . Por fim, na vazão Q3 o valor máximo apresentado no pico de descarga mássica foi de  $0,038 \text{ g.s}^{-1}$  ocorrendo no tempo de 55 segundos.

É possível verificar que a forma do gráfico indicou de que o aumento da rugosidade causou um grande impacto no transporte dos sedimentos, pois houve uma maior distribuição temporal da concentração de sedimentos no escoamento superficial, com intervalos maiores onde foram encontrados os sedimentos. Outro fator que pôde ser notado foi que, numericamente, o valor de pico da carga de sedimentos para as vazões Q2 e Q3 foram praticamente iguais sendo ambos da ordem de  $0,04 \text{ g.s}^{-1}$ .

A Figura 10 apresenta os polutogramas médios para as duas rugosidades, R1 e R2, para que seja possível comparar o comportamento do transporte de sedimentos e o efeito do aumento de rugosidade.

Figura 10 – Polutogramas médios de R1 e R2



Fonte: Autor (2023).

Legenda: a) Q1

b) Q2

c) Q3

Comparando os resultados obtidos em ensaios com diferentes rugosidades, é possível perceber nitidamente o impacto causado pelo aumento da rugosidade, onde a distribuição de sedimentos durante o tempo dos ensaios teve uma alteração significativa.

Nos ensaios com a rugosidade R1, grande parte da quantidade de sedimentos dos ensaios foi coletada em um intervalo muito pequeno de tempo, sendo aproximadamente de 30 segundos para Q1, 12 segundos para Q2 e Q3. O mesmo não ocorreu com a rugosidade R2, onde a quantidade de sedimentos foi distribuída em um intervalo de tempo muito maior.

É possível também perceber que as descargas mássicas de pico dos polutogramas foram muito menores no ensaio com a rugosidade R2 do que com a rugosidade R1. Para a vazão Q1, o aumento de rugosidade fez com que a descarga mássica diminuísse aproximadamente 52 vezes ou 98,09%. Na vazão Q2 esta diminuição foi por volta de 111 vezes ou 99,10% e para a vazão Q3 a descarga de pico foi 99,17% menor, sendo cerca de 121 vezes menor.

A Tabela 5 apresenta os resultados das reduções obtidas nos picos dos polutogramas médios com o aumento da rugosidade.

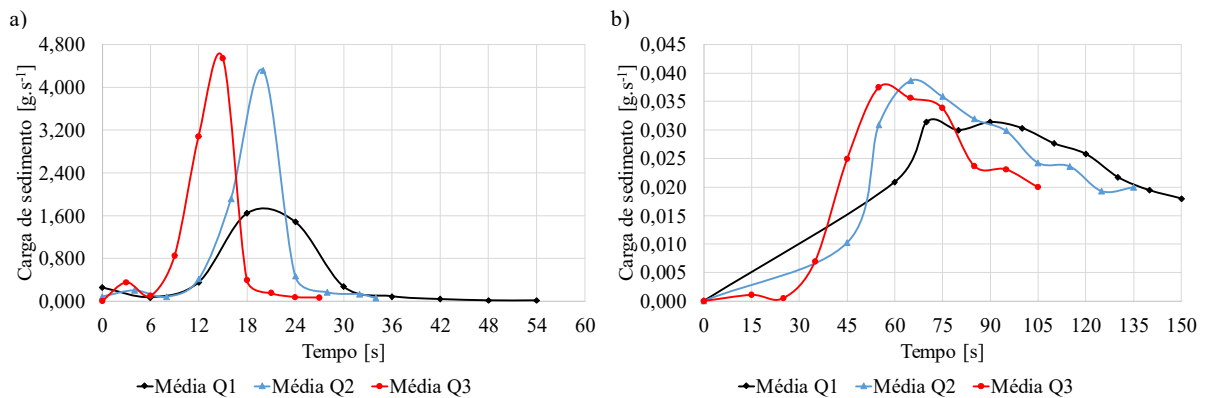
Tabela 5 – Redução dos picos de descarga mássica dos polutogramas médios

Vazão	Descarga de pico [g.s <sup>-1</sup> ]		Redução	
	R1	R2	Nº de vezes	%
Q1	1,64	0,031	52	98,09
Q2	4,31	0,039	111	99,10
Q3	4,54	0,038	121	99,17

Fonte: Autor (2023).

A influência do aumento de vazão também foi analisada e a Figura 11 exhibe os resultados compilados dos polutogramas médios para comparação do efeito do aumento das vazões para cada uma das rugosidades utilizadas.

Figura 11 – Comparativo dos polutogramas médios



Fonte: Autor (2023).

Legenda: a) R1

b) R2

Com a análise dos gráficos da Figura 11, foi possível notar a influência da vazão no transporte de sedimentos. Para ambas as rugosidades, o aumento de vazão de Q1 para Q2 fez com que o polutograma resultante de Q2 fosse mais adiantado com relação ao polutograma de Q1 e o mesmo ocorreu entre as vazões Q2 e Q3, onde Q3 sofreu um adiantamento em relação ao polutograma da vazão Q2, corroborando com o comportamento esperado para os polutogramas quando há o aumento de vazão.

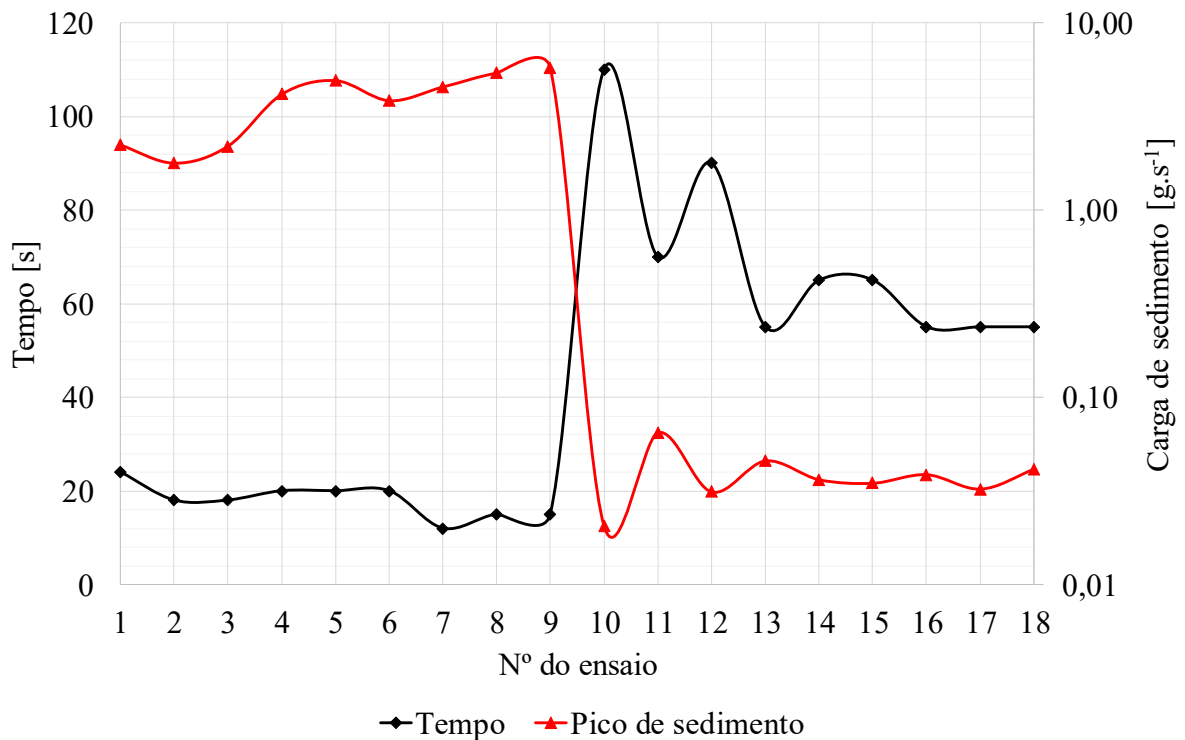
Analisando cada rugosidade separadamente, é possível verificar que, para a rugosidade R1, a medida que houve o aumento da vazão os intervalos onde os sedimentos são encontrados no escoamento diminuíram e o pico do polutograma sofreu um adiantamento em relação aos picos dos polutogramas nas vazões menores. Para a vazão Q1, o intervalo onde foi coletada a

maior parte dos sedimentos foi de aproximadamente 30 segundos, na vazão Q2 este intervalo caiu para cerca de 16 segundos e em Q3 para 12 segundos aproximadamente.

Nos ensaios com a rugosidade R2, foi possível perceber que os sedimentos foram distribuídos em um intervalo de tempo muito maior. Para a vazão Q1 os sedimentos apareceram na primeira coleta aos 60 segundos e, a partir deste instante, observou-se que todas as amostras tinham sedimento e que no final do experimento ainda havia uma grande quantidade de sedimentos retida no canal. Para a vazão Q2, a quantidade de sedimentos no pico do polutograma foi maior do que em Q1 e no instante  $t = 45$  segundos foi possível coletar a primeira amostra com sedimentos que seguiu o mesmo padrão de Q1, apresentado sedimentos em todas as amostras até o final do experimento e uma quantidade considerável retida no canal. Com a vazão Q3 o pico do polutograma pode ser considerado numericamente igual ao valor encontrado em Q2, entretanto o polutograma foi adiantado e a primeira amostra com sedimentos foi coletada aos 15 segundos, apresentado sedimentos em todas as amostras e, assim como para as duas outras vazões, havia bastante sedimento retido na camada rugosa utilizada no canal.

O aumento da rugosidade aumentou consideravelmente a capacidade de reter sedimentos no fundo do canal nas vazões utilizadas. Durante os ajustes das coletas a serem realizadas nos experimentos, percebeu-se que o material não seria todo escoado como acontece para a rugosidade R1 e para que todo o material fosse escoado o tempo de execução dos experimentos se tornaria inviável. Por esse motivo, os experimentos na rugosidade R2 foram padronizados de forma a se obter sedimentos em todas as coletas. Para isso foram realizadas 10 coletas com uma padronização do tempo de coleta em três segundos e um intervalo entre as coletas em sete segundos para todas as vazões, variando apenas o início das coletas, conforme mencionado no parágrafo anterior.

Uma outra forma de representar o adiantamento sofrido nos polutogramas é através do gráfico dos valores máximos da carga de sedimentos presente na vazão de pico dos polutogramas ( $Q_p$ ) e do tempo de ocorrência destes valores de pico ( $t_p$ ) em cada ensaio realizado, que estão apresentados no gráfico da Figura 12.

Figura 12 – Vazão de pico ( $Q_p$ ) x Tempo de pico ( $t_p$ )

Fonte: Autor, 2023

Nos ensaios de 1 a 9, realizados com a rugosidade R1, é possível perceber que a medida que a vazão do escoamento superficial aumenta do ensaio 1 para o ensaio 9, o tempo onde ocorre este pico de carga de sedimento diminui. No ensaio 1, com a vazão  $Q_1$ , por exemplo, o tempo de ocorrência do pico do polutograma foi aos 24 segundos e no ensaio 9, que foi realizado com a vazão  $Q_3$ , o instante do pico do polutograma foi aos 15 segundos, ou seja, houve um adiantamento do polutograma à medida que se aumentou a vazão.

Para os ensaios com a rugosidade R2, de 10 a 18, era esperado que o aumento de rugosidade diminuísse consideravelmente a vazão de pico nos polutogramas e que a relação entre  $Q_p$  e  $t_p$  fosse mantida de forma que a medida que há um aumento da vazão, há também um a diminuição do instante onde ocorre o pico da carga de sedimentos. No ensaio 10, com a vazão de escoamento  $Q_1$ , a carga de sedimentos no pico do polutograma foi de  $0,021 \text{ g.s}^{-1}$  aos 110 segundos. Já para o ensaio 18, o valor da carga de sedimentos no pico do polutograma foi de  $0,041 \text{ g.s}^{-1}$  aos 55 segundos, o que mostra novamente que o aumento de vazão causou um adiantamento nos polutogramas.

## 5 ARTIGO

Este trabalho gerou um artigo denominado “EFEITO DA RUGOSIDADE NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM ESCOAMENTOS SUPERFICIAIS UTILIZANDO CANAL HIDRÁULICO” que foi submetido à revista “Holos”, classificada como A1 na área de Engenharias I, tendo como autores Vinícius Pereira Mello Ribeiro, Rogério Magalhães Coelho, Alexandre Silveira e Lucas José Avelino. O referido artigo encontra-se no Apêndice A.



## 6 CONCLUSÕES

O trabalho tinha como objetivo estudar o transporte de sedimentos no escoamento superficial em áreas urbanas, utilizando areia como sedimento e variando o tipo de cobertura do canal com o intuito de aumentar a rugosidade e verificar se há influência no transporte de sedimentos. Como hipótese, esperava-se que, com o aumento da rugosidade do material de cobertura do canal, houvesse uma diminuição significativa na descarga mássica de pico dos polutogramas e que a quantidade de sedimentos presentes no escoamento superficial diminuísse durante os ensaios.

Os resultados obtidos nos experimentos realizados, mostraram que a hipótese foi confirmada, pois houve uma diminuição da quantidade de material transportado no escoamento superficial com o aumento da rugosidade.

Os experimentos mostraram que o aumento da rugosidade diminuiu significativamente a descarga mássica de pico nos ensaios, sendo 98,09% menor na vazão Q1, 99,10% menor na vazão Q2 e 99,17% na vazão Q3. A quantidade de sedimentos retida pelo material com a maior rugosidade foi muito maior, mostrando que quanto maior a rugosidade do material de fundo do canal, maior será o tempo necessário para transportar toda a quantidade sedimentos. Isso mostra que o aumento da rugosidade do meio é eficiente em auxiliar na retenção de sedimentos no escoamento superficial. Assim sendo, é possível afirmar que aumentar a rugosidade dos materiais do sistema de drenagem onde ocorre o escoamento superficial em áreas urbanas pode causar uma grande influência na forma como os sedimentos são transportados e melhorar a eficiência dos sistemas de drenagem.

Também foi avaliado o efeito do aumento de vazão no adiantamento dos polutogramas. Os experimentos mostraram que a medida que ocorre o aumento da vazão, os picos dos polutogramas são adiantados, ou seja, a medida que a vazão aumenta, a quantidade de sedimentos transportada atinge o exutório do canal em um intervalo de tempo menor. Isso corrobora com o comportamento esperado para o transporte dos sedimentos em situações reais em ambientes urbanos, onde quanto maior a impermeabilização do solo, mais rápido ocorrem o escoamento superficial e há um aumento no pico de descarga mássica dos sedimentos transportados. Dessa forma, pode-se concluir que o transporte de sedimentos nos ambientes urbanos tende a ocorrer de forma mais rápida devido à impermeabilização do solo, o que causa problemas de perda de eficiência nos sistemas de microdrenagem urbana.

Diante disso, fica evidente que é possível a utilização medidas de drenagem urbana que promovam um aumento de rugosidade dos canais e outros locais por onde o escoamento

superficial ocorre. Algumas alternativas são o uso de canais com materiais que promovam um aumento de rugosidade ou até mesmo vegetações, fazendo com que seja possível diminuir a massa de sedimentos transportada no escoamento superficial, diminuindo assim a quantidade de sedimentos que atingem o exutório das bacias hidrográficas urbanas. Além disso, a adoção de soluções deste tipo também pode ser de grande valia para minimizar os impactos ambientais causados pelos sedimentos transportados durante no escoamento superficial e que atingem os corpos hídricos e além de diminuir os custos de manutenções dos sistemas de drenagem urbana.

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam utilizadas diferentes vazões, diferentes inclinações do canal e diferentes tipos de materiais para aumentar a rugosidade do canal onde ocorre o escoamento superficial.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial. Brasília: ANA, 2015.

ALMEIDA, I. de C. **Sistemas sustentáveis de drenagem urbana: uma proposta para a bacia hidrográfica do córrego São Pedro, em Juiz de Fora – MG**. 2020. 64p. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal De Juiz De Fora, Juiz de Fora, 2020.

ALMEIDA, P. H. de. **Desenvolvimento do processo de implantação da rede de monitoramento hidrológico na bacia hidrográfica do rio meia ponte**. 2020. 100p. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

BALLARD, B. W. *et al.* Construction industry research and information association. **The SuDS manual**. London: CIRIA. 2015.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). **Portal HidroWeb**. 2023. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 08 dez. 2023.

CANALES, F. A.; MENDES, C. A. B. Gestão da água na bacia amazônica: história, conflitos e oportunidades. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: ABRHidro, 2011. p. 1-14. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=11408>. Acesso em: 27 maio 2023.

CANHOLI, J. F. **Medidas de controle in situ do escoamento superficial em áreas urbanas: análise de aspectos técnicos e legais**. 2013. 167p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CARVALHO, T. M. de. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. **RBGF – Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife-PE Vol. 01 n.01 Mai/Ago 2008, 73-85.

COLLODEL, M. G. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. 2009. 225f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

DOTTO, C.B. S. **Acumulação e balanço de sedimentos em superfícies asfálticas em área urbana de Santa Maria - RS**. 2006. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

FELICE, J. G. **Transporte de material em suspensão e dissolvido em modelo físico com superfície impermeável utilizando chuva simulada**. 2017. 57f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2017.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Cadernos temáticos saneamento básico: drenagem e manejo das águas pluviais Urbanas**. Disponível em: <https://www.funasa.gov.br/documents/20182/300120/Drenagem+e+Manejo+das+%C3%81guas+Pluviais+Urbanas.pdf/72c03623-99ee-40d8-b1e8-107c182daf8e?version=1.0>. Acesso em: 29 abr. 2023.

GUITARRARA, P. Brasil Escola. **Enchentes no Brasil**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/as-grandes-enchentes-no-brasil.htm>. Acesso em 30 abr. 2023a.

GUITARRARA, P. Brasil Escola. **Problemas ambientais urbanos**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/problemas-ambientais-dos-grandes-centros.htm>. Acesso em 30 de abril de 2023b.

GUTIERREZ, A. I. R; RAMOS, I. C. **Guia de técnicas sustentáveis em drenagem urbana**. 2017. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/59627067/versao-em-revista-do-manual-de-tecnicas-sustentaveis-em-drenagem-urbana-3>. Acesso em: 02 mai. 2023.

IBGE. Pesquisa Nacional de Amostra por Domicílios. **População urbana e rural no Brasil**. 2015. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html>. Acesso em: 03 ago. 2023

JULIANA, B. M. **Transporte de microplásticos na drenagem urbana: simulações utilizando chuva artificial**. 2021. 62f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2021.

KALIN, L.; HANTUSH, M. M. **Evaluation of sediment transport models and comparative application of two watershed models**. Cincinnati, Ohio, 2003. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=fcf3db07b2b8072f036c36474eb381a767925b3d>. Acesso em: 25 jul. 2022.

KIAT, C. C. *et al.* Sediment transport modeling for Kulim River: a case study. **Journal of Hydro-environment Research**. [S.l.]: v. 2, n. 1, p. 47-59, set. 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S157064430800021X>. Acesso em: 13 mar. 2023.

LIMA, B. O. **Transporte de material dissolvido pelo escoamento superficial produzido por um simulador de chuva sobre uma superfície impermeável**. 2017. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2017.

MARTINS, J. R. S. **Gestão da drenagem urbana: só tecnologia será suficiente?**. [São Paulo]: p. 1-11, jul. 2012. Disponível em: [https://www.bariri.sp.gov.br/arquivos/28\\_gestaodrenagem.pdf](https://www.bariri.sp.gov.br/arquivos/28_gestaodrenagem.pdf). Acesso em: 30 abr. 2023.

MORA-MELIÀ, D. *et al.* Viability of green roofs as a flood mitigation element in the central region of Chile. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 1130, 1 abr. 2018. doi:10.3390/su10041130.

MORUZZI, R. B. *et al.* Avaliação do desempenho de canal gramado na remoção de material suspenso em escoamento superficial pluvial. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 501–511, 1 maio 2017.

ONU. Department of Economic and Social Affairs. **World Urbanization Prospects, 2018**. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Country-Profiles/>. Acesso em: 14 jul. 2023.

PESSOTI, B. P. L. **Transporte de material em suspensão e dissolvido em superfície impermeável sob chuva artificial**. 2018. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2018.

QUILES, E. Z. **Influência da implantação de bacia de retenção e da ocupação no amortecimento de hidrogramas e do transporte de material solúvel utilizando modelo reduzido**. 2019. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2019.

SEIBT, A. C. *et al.* Comparação das vazões de projeto pelo método racional e método tempo área para bacias urbanas do município de Goiânia – GO. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 4, n. 2, 2012. DOI: 10.5216/reec.v4i2.19513. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/19513>. Acesso em: 30 abr. 2023.

SILVEIRA, A. *et al.* Assessment of loose and adhered urban street sediments and trace metals: a study in the city of Poços de Caldas, Brazil. **J Soils Sediments**. v.16, 2640–2650 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1467-5>

TUCCI, C. E. M. (org.); Porto, R. L. L.; Barros, M. T. de. **Drenagem Urbana**. 1ª ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995. v.5.

TUCCI, C. E. M (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 2001. v.4.

TUNDISI, J. E. M. **Indicadores da qualidade da bacia hidrográfica para gestão integrada dos recursos hídricos**. Estudo de caso: Bacia hidrográfica do Médio Tocantins (TO). 2006. 152p. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, 2006.

UNESCO. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **Water for people, water for life: the United Nations world water development report; a joint report by the twenty-three UN agencies concerned with freshwater**. 2003. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000129726.page=87>. Acesso em: 04 set. 2022.

VASCONCELOS, V. de M. M.; SOUZA, C. F. Caracterização dos parâmetros de qualidade da água do manancial Utinga, Belém, PA, Brasil. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 6, n. 2, p. 305-324, 2011.

VIJESCU, M.; BEILICCI, E.; BEILICCI, R. Sediment transport modelling with advanced hydroinformatic tool case study – Modelling on Bega channel sector. **Procedia Engineering. Online**, v. 161, p. 1715-1721, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816328806?via%3Dihub>. Acesso em: 08 mai. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.651>.

WMO. World Meteorological Organization. **Guide to hydrological practice**. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. Geneva, Switzerland. 2008. Disponível em: [https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/monitoramento-hidrologico/orientacoes-manuais/entidades/hydrology-2013-from-measurement-to\\_2020.pdf](https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/monitoramento-hidrologico/orientacoes-manuais/entidades/hydrology-2013-from-measurement-to_2020.pdf)  
Acesso em: 03 dez 2023.

**APÊNDICE A – ARTIGO ENVIADO PARA PUBLICAÇÃO**

## EFFECT OF ROUGHNESS ON SEDIMENT TRANSPORT IN SURFACE RUNOFF USING HYDRAULIC CHANNEL

V. P. M. RIBEIRO, R. M. COELHO, A. SILVEIRA\*, L. J. AVELINO

Universidade Federal de Alfenas

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9479-4670>\*

[alexandre.silveira@unifal-mg.edu.br](mailto:alexandre.silveira@unifal-mg.edu.br)\*

Submetido 04/01/2024 - Aceito xx/xx/2024

DOI: 10.15628/holos.2023.XXXX

### ABSTRACT

Urban development has significantly changed the urban hydrological cycle, causing environmental problems, such as increased sediment transport in surface runoff. The high cost of field studies has made physical modeling more relevant. The objective of this work was to study the effect of roughness on sediment transport in surface flow. The experiments were carried out in an acrylic channel with two different roughnesses, in triplicates for three different flow rates. The results showed that the

peaks of the pollutograms were much smaller for roughness R2 in relation to roughness R1 and that the temporal distribution of sediments in the pollutograms was much smaller for roughness R1 in relation to roughness R2. It was found that the increase in roughness caused a significant decrease in the peak pollutograms and the amount of sediment in the surface runoff decreased considerably due to greater sediment retention with the increase in roughness.

**KEYWORDS:** urban drainage, surface runoff, hydrology, hydraulics.

## EFEITO DA RUGOSIDADE NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM ESCOAMENTOS SUPERFICIAIS UTILIZANDO CANAL HIDRÁULICO

### RESUMO

O desenvolvimento urbano mudou expressivamente o ciclo hidrológico urbano, causando problemas ambientais, como o aumento do transporte de sedimentos no escoamento superficial. O alto custo de estudos de campo, fez com que modelagens físicas se tornassem mais relevantes. O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito da rugosidade no transporte de sedimentos no escoamento superficial. Os experimentos foram feitos em um canal de acrílico com duas rugosidades diferentes, em trélicas para três vazões

diferentes. Os resultados mostraram que os picos dos polutogramas foram muito menores para a rugosidade R2 em relação à rugosidade R1 e que a distribuição temporal dos sedimentos nos polutogramas foi muito menor para a rugosidade R1 em relação à rugosidade R2. Verificou-se que o aumento da rugosidade causou uma diminuição significativa no pico dos polutogramas e a quantidade de sedimentos no escoamento superficial diminuiu consideravelmente devido à maior retenção de sedimentos com o aumento de rugosidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** drenagem urbana, escoamento superficial, hidrologia, hidráulica.





## 1 INTRODUCTION

The growth of population in cities in a short space of time, often without due planning, caused the soil to become increasingly impermeable, increasing the amount of water runoff after precipitation events and led to an increase in pollution, impacting directly the quality of life of the population of cities, generating economic, social and environmental impacts.

In urban basins, the changes caused by urbanization in the natural conditions of infiltration, topography, vegetation cover and natural drainage networks, modify the water distribution processes between the earth's surface, subsoil and atmosphere (Canholi, 2013).

There is a strong need to deepen knowledge of the processes in which urbanization modifies the natural water cycle, and in particular, how urban structures influence the surface runoff process (Isidoro, Silveira & Lima, 2019).

Kiat, Ghani, Abdullah and Zakariaiat (2008) say that rapid urbanization has an accelerated impact on the hydrology of the basin and its geomorphology. This development that occurs in the basin areas leads to an increase in sediment transport due to the drastic increase that occurs in surface runoff.

Sediment sources can have natural origins, such as wind erosion, erosion caused by rain, stream erosion, rainwater runoff and bank erosion, or anthropogenic origin, where examples can be wastewater discharge, crops, civil construction and mining. Thus, sediments can serve as a transport medium for pesticides, radioactive materials and nutrients, generating water quality problems (Kalin & Hantush, 2003). From small particles, such as micro plastics, to larger sediments, they can be carried in surface runoff resulting from a precipitation event. Furthermore, not only sediments can be present in runoff, but also heavy metals such as Cadmium and Nickel can be transported and impact the quality of water resources (Silveira, Pereira Jr, Poletto, Lima, Gonçalves, Alvarenga & Isidoro, 2016).

Therefore, understanding the phenomena that are related to sediment transport is important to be able to predict the behavior of sediment and contaminant transport in surface water networks. Due to its negative effects, sediment transport is considered a critical process in many hydrotechnical and environmental systems (Visescu, Beilicci & Beilicci, 2016).

Studies on the behavior of sediment transport in surface runoff in urban areas can be carried out in different ways, such as field studies, pilot or reduced scale physical models and even computational modeling.

The difficulties in carrying out work in the field are important factors to be considered. According to Quiles (2019), the lack of data leads to difficulties in developing research in areas of knowledge such as hydrology and climatology, for example. Lima (2017) highlights that in urban basins, the operational difficulty, the unpredictability of whether or not precipitation occurs and the size of the control area, for example, are factors that make monitoring on a real scale difficult.

According to Felice (2017), on laboratory scales, physical models and rain simulators have been successful for some time in studying the behavior of the rain-runoff process and, lately, they have also been successful in work on the dynamics of transport of sediments and pollutants in surface runoff.

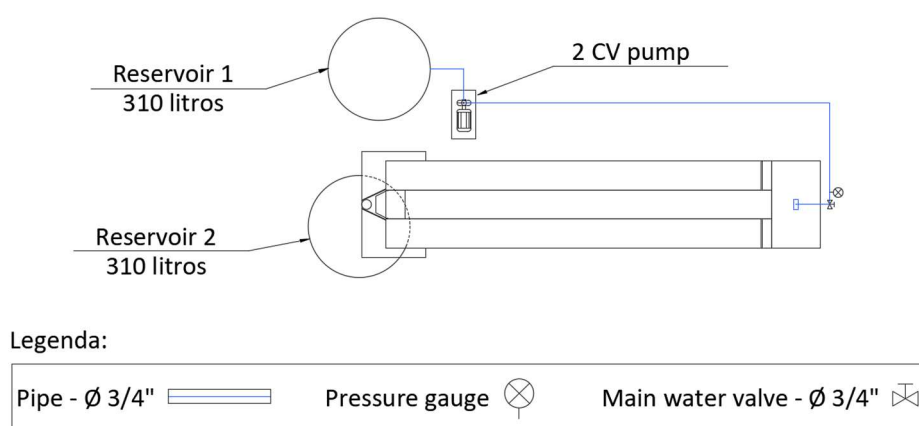
That said, and considering that field studies are laborious and financially expensive, a way to complement studies on sediment transport in surface runoff is the use of physical models, which allow controlling some variables that are difficult to control on real scales, as reduce research costs and time.

This work has the general objective of studying the behavior of sediment transport in surface runoff in a hydraulic channel and the specific objective of verifying the effect of varying roughness on the behavior of the amount of material transported in surface runoff.

## 2 METHODOLOGY

### 2.1 Description of the hydraulic channel

The hydraulic channel of the hydrology laboratory at the Federal University of Alfnas, Poços de Caldas campus, Minas Gerais, is composed of a channel constructed with acrylic material, completely waterproofed and smooth, divided into three 30 cm wide channels. The simulator also has a water pumping system that consists of a 310-liter reservoir that serves as a power source for the system and a pump with a power of 2 CV, which pumps water through a pipe with a diameter of 3/4" for the channel. The system has a register to control the water flow in the simulator system. To protect the pumping system from the sediments used, the drained water is not recirculated and is collected by another 310-liter reservoir, where the sediments settle and only the water is directed to the hydrosanitary system of the Federal University of Alfnas, as shown in Figure 1.



**Figure 1: Hydraulic channel hydraulic system**

## 2.2 Methods

Tests were carried out with two different roughnesses in the channel, where the roughness R1 is that of the acrylic in the channel and R2 is the roughness of the acrylic plate covered with coarse sand. The roughness values adopted were  $n = 0.010$  for R1 and  $n = 0.025$  for R2.

The tests were carried out in replicates for three different flow rates, ranging from 0.15 to 0.25 L.s<sup>-1</sup> and 25 grams of sediment were used per test, as shown in Table 1.

**Table 1: Tests characteristics**

Test ID	Flow rate ID	Average flow rate (L.s <sup>-1</sup> )	Roughness	Sediment mass (g)
1				
2	Q1	0,15	R1	
3				
4				
5	Q2	0,20	R1	
6				
7				
8	Q3	0,25	R1	
9				
10				25
11	Q1	0,15	R2	
12				
13				
14	Q2	0,20	R2	
15				
16				
17	Q3	0,25	R2	
18				

Samples were collected using plastic containers with a volume of one liter. For roughness R1, the collection time was three seconds with a three-second interval between collections for flow rate Q1 and for flows Q2 and Q3, collections were made for two seconds with an interval between collections of two seconds. For roughness R2, collections were three seconds with a seven-second interval between collections for all flow rates. For flow Q1, collections began at  $t = 60$  seconds, for Q2 at  $t = 45$  seconds and for Q3 at  $t = 15$  seconds.

After collecting the samples, the filtration process was carried out, using fiberglass filters, which were dried in an oven for 24 hours at 103°C before the filtration process. After drying the filters, they were removed and placed in desiccators to reach room temperature before being weighed to obtain their mass without sediment. For the sample filtration process, the filtration system was used, where the filter paper was placed in the center of the filter support and the

vacuum pump was turned on. The sample was homogenized in the bottle, poured over the filter and the walls of the container were washed with distilled water to minimize the loss of sediment in the filtering process. The filters were carefully removed with tweezers and transferred to their respective identified containers. After this process, the samples were dried in an oven at 103°C for 24 hours, removed and placed in a desiccator to reach room temperature and, finally, the samples were weighed to obtain the mass of sediment drained.

The collected data were processed with the help of electronic spreadsheets to create pollutograms and the calculation of the amount of total suspended solids was carried out using Equation 1, where SST is the total suspended solids, in  $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ;  $M_1$  is the mass of the filter + petri dish set, dry and without sediment, in grams;  $M_2$  is the mass of the filter + petri dish assembly, dry and with sediment, in grams and  $V$  is the volume of the sample, in ml.

$$SST = \frac{(M_2 - M_1) \times 1000}{V} \quad (1)$$

### 3 RESULTS AND DISCUSSIONS

The pollutograms obtained in the tests with the initial roughness (R1) of the channel are shown in Figure 2.

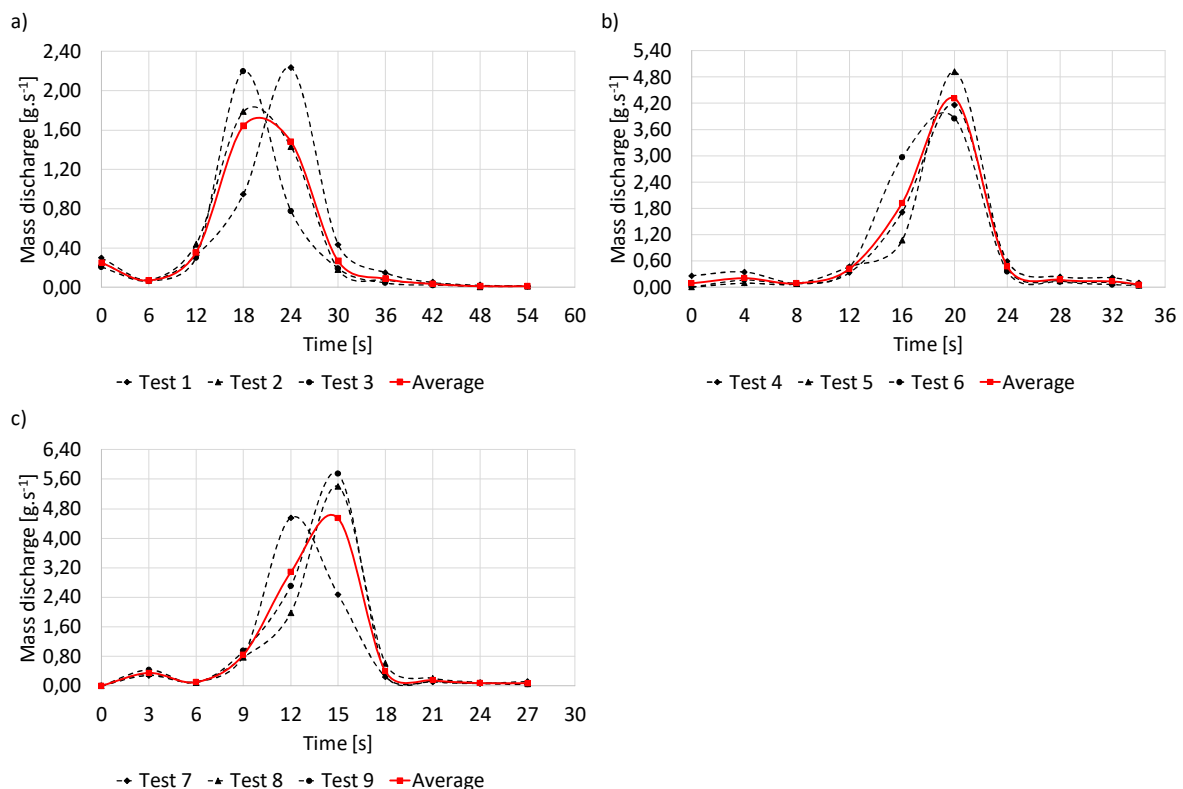
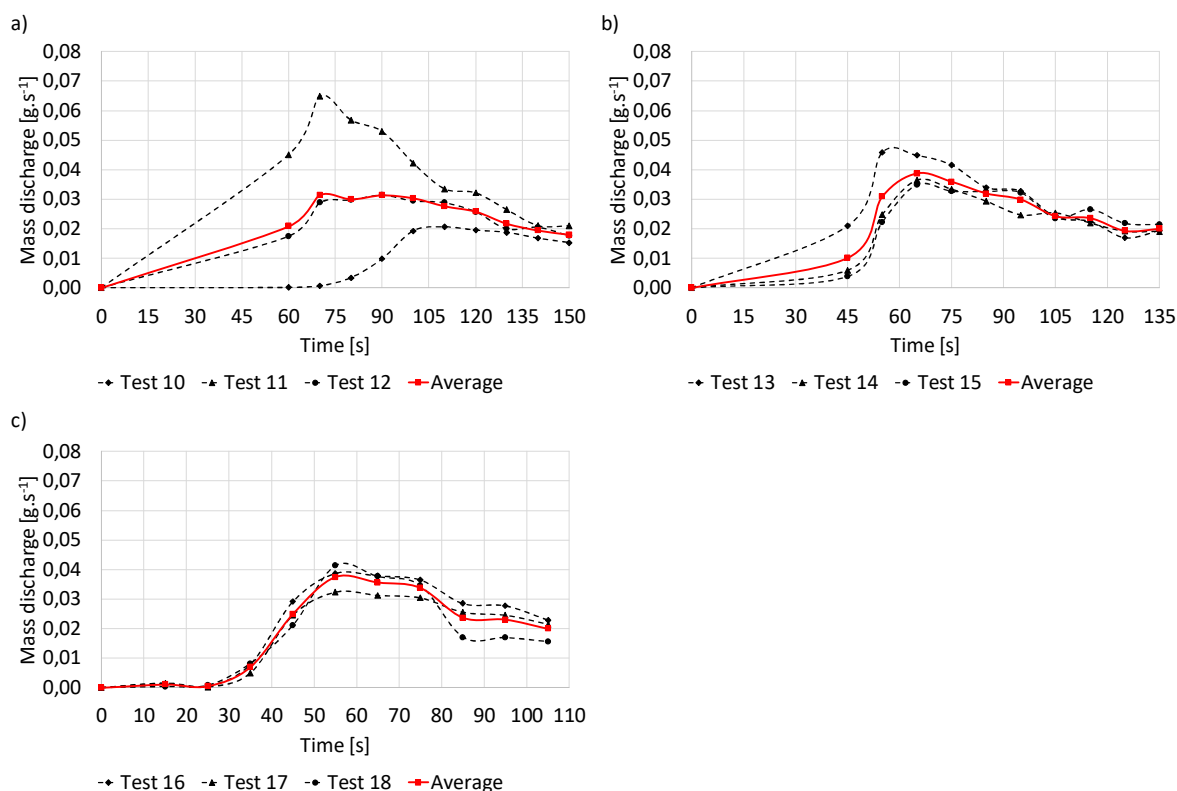


Figure 2: Pollutograms for roughness R1: a) Q1; b) Q2 and c) Q3.

For a flow rate of 0.15 L.s<sup>-1</sup>, the pollutogram peak occurs between 18 and 24 seconds and the highest value found was 2.23 g.s<sup>-1</sup> in the first test. In the test with flow rate Q2, there was an increase in flow rate from 0.15 to 0.20 L.s<sup>-1</sup> and the peak of the sediment load occurred between seconds 16 and 20. The highest value found for the sediment load with this flow rate occurred in test number 5 with a value of 4.93 g.s<sup>-1</sup>. For flow rate Q3, with a value equal to 0.25 L.s<sup>-1</sup>, the highest value found was 5.74 g.s<sup>-1</sup> in test number 9 and the pollutogram peaks occurred between seconds 12 and 15.

Figure 3 presents the pollutograms with the results of the tests from the second stage of the experiment, where the highest roughness (R2) was used.



**Figure 3: Pollutograms for roughness R2: a) Q1; b) Q2 and c) Q3**

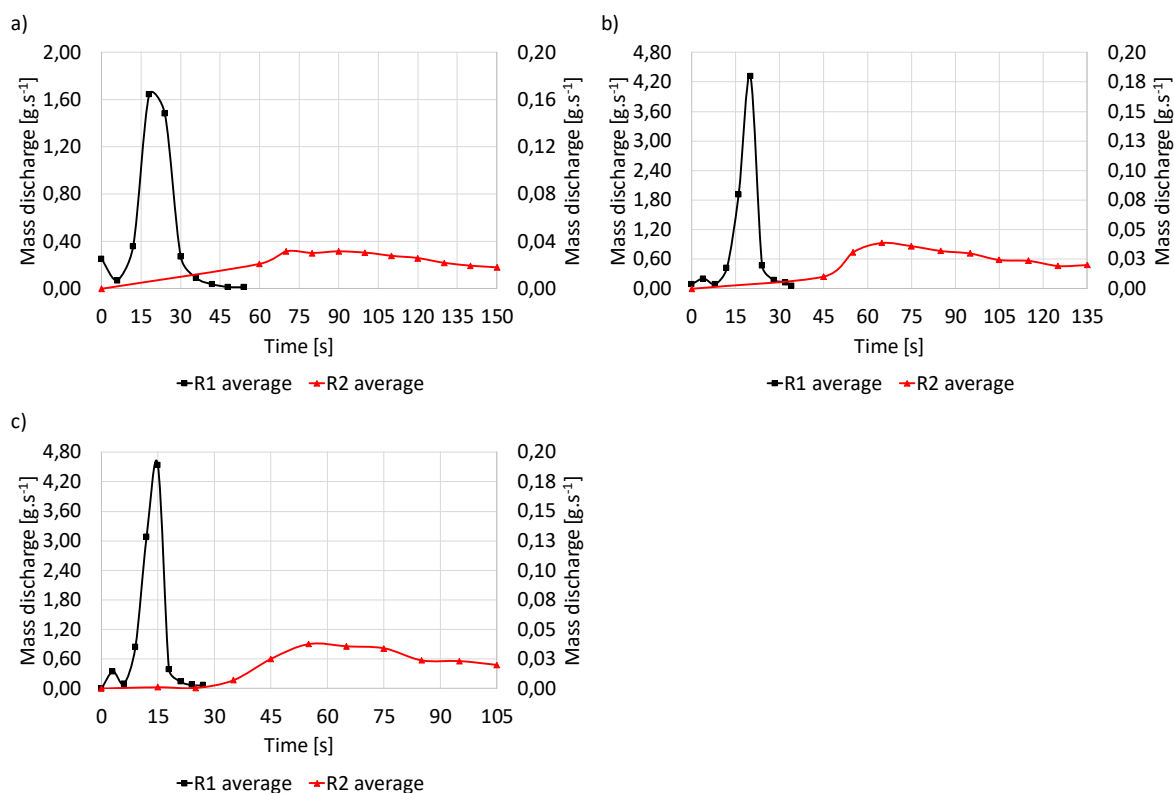
For flow rate Q1, the average flow peak had a value of 0.031 g.s<sup>-1</sup> at 90 seconds and for flow rate Q2 the peak occurred at 65 seconds with a maximum value equal to 0.039 g.s<sup>-1</sup>. Finally, at flow rate Q3, the maximum value presented at the mass discharge peak was 0.038 g.s<sup>-1</sup>, occurring in 55 seconds.

It is possible to verify that the shape of the graph indicated that the increase in roughness caused a major impact on sediment transport, as there was a greater temporal distribution of sediment concentration in surface runoff, with greater intervals where sediments were found.



Another factor that could be noted was that, numerically, the peak value of the sediment load for flows Q2 and Q3 were practically equal, both being on the order of  $0.04 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Figure 4 presents the average pollutograms for the two roughnesses, R1 and R2, so that it is possible to compare the behavior of sediment transport and the effect of increasing roughness.



**Figure 4: Average pollutograms for R1 and R2: a) Q1; b) Q2 and c) Q3.**

Comparing the results obtained from tests with different roughness, it is possible to clearly perceive the impact caused by the increase in roughness, where the distribution of sediments during the test time had a significant change.

In tests with roughness R1, a large part of the amount of sediment in the tests was collected in a very short period of time, approximately 30 seconds for Q1, 12 seconds for Q2 and Q3. The same did not occur with roughness R2, where the amount of sediment was distributed over a much longer time interval.

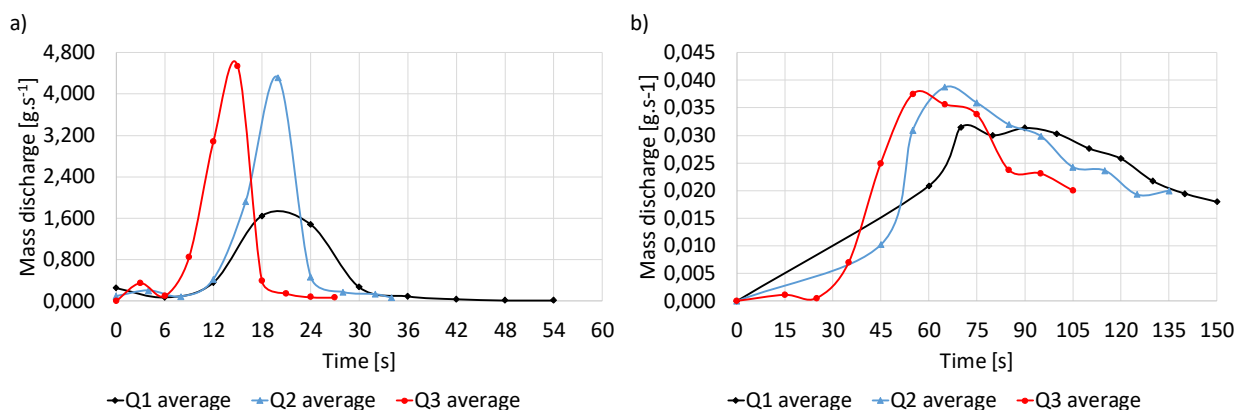
It is also possible to notice that the peak mass discharges of the pollutograms were much lower in the test with roughness R2 than with roughness R1. For flow rate Q1, the increase in roughness caused the mass discharge to decrease approximately 52 times or 98.09%. At flow rate Q2 this decrease was around 111 times or 99.10% and for flow rate Q3 the peak discharge was 99.17% lower, being around 121 times lower.

Table 2 presents the results of the reductions obtained in the peaks of the average pollutograms with the increase in roughness.

**Table 2: Reduction of mass discharge peaks of average pollutograms**

Flow rate	Mass discharge peaks (g.s <sup>-1</sup> )		Reduction	
	R1	R2	Number of times	%
Q1	1,64	0,031	52	98,09
Q2	4,31	0,039	111	99,10
Q3	4,54	0,038	121	99,17

The influence of increased flow was also analyzed and Figure 5 displays the compiled results of the average pollutograms to compare the effect of increased flow for each of the roughnesses used.



**Figure 5: Average pollutograms comparison: a) R1 and b) R2**

By analyzing the graphs in Figure 5, it was possible to notice the influence of flow on sediment transport. For both roughnesses, the increase in flow from Q1 to Q2 caused the resulting pollutogram of Q2 to be more advanced in relation to the pollutogram of Q1 and the same occurred between the flows Q2 and Q3, where Q3 suffered an advance in relation to the pollutogram of the Q2 flow, corroborating the expected behavior for the pollutograms when there is an increase in flow.

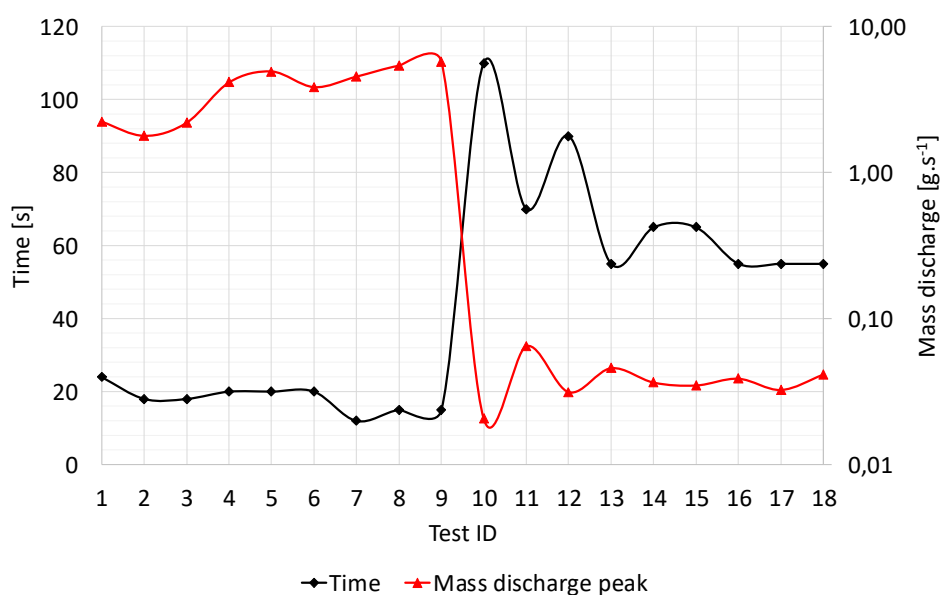
Analyzing each roughness separately, it is possible to verify that, for roughness R1, as the flow rate increased, the intervals where sediments are found in the flow decreased and the pollutogram peak advanced in relation to the pollutogram peaks at lower flows. . For flow Q1, the interval where most of the sediment was collected was approximately 30 seconds, at flow Q2 this interval fell to approximately 16 seconds and at Q3 to approximately 12 seconds.



In tests with roughness R2, it was possible to notice that the sediments were distributed over a much longer time interval. For flow Q1, sediments appeared in the first collection at 60 seconds and, from this moment on, it was observed that all samples had sediment and that at the end of the experiment there was still a large amount of sediment retained in the channel. For flow Q2, the amount of sediment at the peak of the pollutogram was greater than in Q1 and at time  $t = 45$  seconds it was possible to collect the first sample with sediment that followed the same pattern as Q1, showing sediment in all samples up to the end of the experiment and a considerable amount retained in the channel. With flow rate Q3, the peak of the pollutogram can be considered numerically equal to the value found in Q2, however the pollutogram was advanced and the first sample with sediment was collected at 15 seconds, showing sediment in all samples and, as well as for the other two flow rates, there was a lot of sediment retained in the rough layer used in the channel.

The increase in roughness considerably increased the capacity to retain sediments at the bottom of the channel at the flow rates used. During the adjustments of the collections to be carried out in the experiments, it was realized that the material would not all be drained as is the case for roughness R1 and for all the material to be drained the execution time of the experiments would become unfeasible. For this reason, the experiments at roughness R2 were standardized in order to obtain sediments in all collections. To this end, 10 collections were carried out with a standardization of the collection time in three seconds and an interval between collections in seven seconds for all flow rates, only varying the beginning of the collections, as mentioned in the previous paragraph.

Another way to represent the advance suffered in the pollutograms is through the graph of the maximum values of the sediment load present in the peak flow of the pollutograms ( $Q_p$ ) and the time of occurrence of these peak values ( $t_p$ ) in each test carried out, which are presented in the graph in Figure 6.



**Figure 6: Peak flow rate ( $Q_p$ ) x peak time ( $t_p$ )**





In tests 1 to 9, carried out with roughness R1, it is possible to see that as the surface flow rate increases from test 1 to test 9, the time during which this sediment load peak occurs decreases. In test 1, with flow rate Q1, for example, the time of occurrence of the pollutogram peak was at 24 seconds and in test 9, which was carried out with flow rate Q3, the instant of peak pollutogram was at 15 seconds, i.e., there was an advance in the pollutogram as the flow increased.

For tests with roughness R2, from 10 to 18, it was expected that the increase in roughness would considerably reduce the peak flow in the pollutograms and that the relationship between  $Q_p$  and  $t_p$  would be maintained so that as there is an increase in flow, there is also a decrease in the instant where the peak sediment load occurs. In test 10, with flow rate Q1, the sediment load at the peak of the pollutogram was  $0.021 \text{ g.s}^{-1}$  at 110 seconds. For test 18, the value of the sediment load at the peak of the pollutogram was  $0.041 \text{ g.s}^{-1}$  at 55 seconds, which again shows that the increase in flow caused an increase in pollutograms.

## 4 CONCLUSIONS

The aim of the work was to study sediment transport in surface runoff in urban areas, using sand as sediment and varying the type of channel coverage in order to increase roughness and check whether there is an influence on sediment transport. As a hypothesis, it was expected that, with the increase in the roughness of the channel covering material, there would be a significant decrease in the peak mass discharge of the pollutograms and that the amount of sediment present in the surface flow would decrease during the tests.

The results obtained in the experiments carried out showed that the hypothesis was confirmed, as there was a decrease in the amount of material transported in the surface flow with the increase in roughness.

The experiments showed that the increase in roughness significantly reduced the peak mass discharge in the tests, being 98.09% lower in flow rate Q1, 99.10% lower in flow rate Q2 and 99.17% lower in flow rate Q3. The amount of sediment retained by the material with the highest roughness was much greater, showing that the greater the roughness of the channel bottom material, the longer it will take to transport the entire amount of sediment. This shows that increasing the roughness of the medium is efficient in helping to retain sediment in surface runoff. Therefore, it is possible to state that increasing the roughness of materials in the drainage system where surface runoff occurs in urban areas can have a major influence on the way in which sediments are transported and improve the efficiency of drainage systems.

The effect of the increase in flow on the advancement of pollutograms was also evaluated. The experiments showed that as the flow increases, the pollutogram peaks are brought forward, that is, as the flow increases, the amount of sediment transported reaches the channel outlet in a shorter period of time. This corroborates the expected behavior for sediment transport in real situations in urban environments, where the greater the soil sealing, the faster surface runoff occurs and there is an increase in the peak mass discharge of transported sediments. Therefore, it can be concluded that sediment transport in urban environments tends to occur more quickly due to soil sealing, which causes problems with loss of efficiency in urban microdrainage systems.

In view of this, it is clear that it is possible to use urban drainage measures that promote an increase in the roughness of channels and other places where surface runoff occurs. Some alternatives are the use of channels with materials that promote increased roughness or even vegetation, making it possible to reduce the mass of sediment transported in surface runoff, thus reducing the amount of sediment that reaches the outflow of urban river basins. Furthermore, the adoption of solutions of this type can also be of great value in minimizing the environmental impacts caused by sediments transported during surface runoff and reaching water bodies and in addition to reducing the maintenance costs of urban drainage systems.

For future work, it is suggested that different flow rates, different channel inclinations and different types of materials be used to increase the roughness of the channel where surface flow occurs.

## 5 ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by FAPEMIG (Foundation for Research Support in the State of Minas Gerais) through the APQ-02045-17 project, the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) and the Federal University of Alfenas (UNIFAL-MG), Poços de Caldas Campus.

## 6 REFERENCES

- CANHOLI, J. F. (2013). *Medidas de controle in situ do escoamento superficial em áreas urbanas: análise de aspectos técnicos e legais*. [Master thesis, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo].
- FELICE, J. G. (2017). *Transporte de material em suspensão e dissolvido em modelo físico com superfície impermeável utilizando chuva simulada*. [Master thesis, Universidade Federal de Alfenas].
- Kalin, L. & Hantush, M. M. (2003). *Evaluation of sediment transport models and comparative application of two watershed models*. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory.
- Kiat, C. C., Ghani, A. A., Abdullah, R., & Zakaria, N. A. (2008). Sediment transport modeling for Kulim River – A case study. *Journal of Hydro-environment Research*. 2(1), 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2008.04.002>
- LIMA, B. O. (2017). *Transporte de material dissolvido pelo escoamento superficial produzido por um simulador de chuva sobre uma superfície impermeável*. [Master thesis, Universidade Federal de Alfenas].
- QUILES, E. Z. (2019). *Influência da implantação de bacia de retenção e da ocupação no amortecimento de hidrogramas e do transporte de material solúvel utilizando modelo reduzido*. [Master thesis, Universidade Federal de Alfenas].



- Isidoro, J. M. G. P., Silveira, A. & Lima, B. O. (2022). Development of a large-scale rainfall simulator for urban hydrology research. *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, 27(1), 169–173. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220200365>
- Silveira, A. Pereira, J. A., Poletto, C., de Lima, J. L. M. P., Gonçalves, F. A., Alvarenga, L. A., & Isidoro, J. M. P. G. (2016). Assessment of loose and adhered urban street sediments and trace metals: a study in the city of Poços de Caldas, Brazil. *Journal of Soils and Sediments*. 16(11), 2640–2650. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1467-5>.
- Visescu, M., Beilicci, E. & Beilicci, R. (2016). Sediment transport modelling with advanced hydroinformatic tool case study – Modelling on Bega channel sector. *Procedia Engineering*, 161, 1715-1721. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.651>.

