

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**SIMONE SIQUEIRA DOS REIS**

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE E DA ALTURA DE EDIFICAÇÕES NA  
TRANSFORMAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO UTILIZANDO CHUVA  
SIMULADA EM MODELO REDUZIDO DE BACIA HIDROGRÁFICA URBANA COM  
DIFERENTES DECLIVIDADES**

**Poços de Caldas/MG**

**2015**

**SIMONE SIQUEIRA DOS REIS**

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE E DA ALTURA DE EDIFICAÇÕES NA  
TRANSFORMAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO UTILIZANDO CHUVA  
SIMULADA EM MODELO REDUZIDO DE BACIA HIDROGRÁFICA URBANA COM  
DIFERENTES DECLIVIDADES**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Faculdade Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas. UNIFAL-MG.

Área de concentração: Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos.

Orientador: Alexandre Silveira

Co-Orientador: Jorge Manuel Guieiro  
Pereira Isidoro.

**Poços de Caldas/ MG**

**2015**

R375i Reis, Simone Siqueira dos.  
Influência da densidade e da altura de edificações na transformação de precipitação-escoamento utilizando chuva simulada em modelo reduzido de bacia hidrográfica urbana com diferentes declividades / Simone Siqueira dos Reis. – Poços de Caldas, 2015. 89 f. -

Orientador: Alexandre Silveira.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2015. Bibliografia.

1. Hidrologia urbana. 2. Modelagem física. 3. Chuvas – Métodos de simulação. 4. Hidrometria. I. Silveira, Alexandre. II. Título.

CDD: 551.48

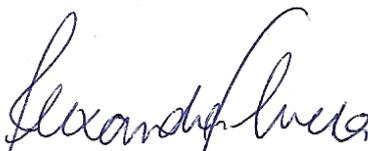
**SIMONE SIQUEIRA DOS REIS**

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE E ALTURA DE EDIFICAÇÕES NA  
TRANSFORMAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO  
UTILIZANDO CHUVA SIMULADA EM MODELO REDUZIDO DE  
BACIA HIDROGRÁFICA URBANA COM DIFERENTES  
DECLIVIDADES**

A banca examinadora abaixo-assinada,  
aprova a Dissertação apresentada como  
parte dos requisitos para obtenção do  
título de mestre em Ciência e  
Engenharia Ambiental, pelo Programa  
de Pós-Graduação em Ciência e  
Engenharia Ambiental da Universidade  
Federal de Alfenas.

Área de Concentração: Ciência e  
Engenharia Ambiental.

Aprovada em: 01 de junho de 2015.



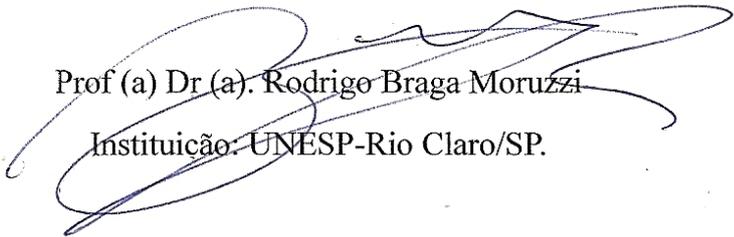
Prof (a) Dr (a) Alexandre Silveira

Instituição: UNIFAL-MG



Prof (a) Dr (a). Flávio Aparecido Gonçalves

Instituição: UNIFAL-MG



Prof (a) Dr (a). Rodrigo Braga Moruzzi

Instituição: UNESP-Rio Claro/SP.

Dedico ao meu esposo Luiz Antonio e  
minha filha Maria Carolina: meus  
amores, minha vida!

*Em memória de Maria Nilza Siqueira*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental pela oportunidade oferecida.

Aos Professores Alexandre Silveira e Jorge Isidoro, pela orientação, ensinamentos e paciência.

Aos Professores Rodrigo Braga Moruzzi e Antônio Marciano da Silva, pelas contribuições e importantes questionamentos na qualificação.

Ao Professor Flávio Gonçalves, pela ajuda na fase de inicial de ensaios.

Ao Professor Fábio Ponciano de Deus, pela amizade, apoio em tempos difíceis de laboratório e ajuda para conclusão deste trabalho.

A Mariana Lessa, pela amizade e ajuda com os ensaios.

Aos amigos do Laboratório das Engenharias: Ana Paula, Bruno, Deivid, Daniel, Guilherme, Luana, Marcel e Mansueto, pelo bom humor, companhia e colaboração na montagem e realização dos ensaios.

A minha irmã Cristiane, pela ajuda incondicional.

Ao meu esposo Luiz Antonio, pelo carinho, incentivo e por todos os conselhos e broncas merecidas.

A minha filha, Maria Carolina, pela compreensão por todos (os muitos) momentos em que estive ausente ou cansada para brincar.

A todos que de alguma maneira ajudaram na realização deste trabalho.

“Sei bem o que é passar necessidade e sei o que é andar com fartura. Aprendi o mistério de viver feliz em todo lugar e em qualquer situação, esteja bem alimentado, ou mesmo com fome, possuindo fartura, ou passando privações. Tudo posso naquele que me fortalece. Entretanto, fizestes bem em participar da minha aflição...”

(Filipenses 4)

## RESUMO

O aumento da população urbana que se tem observado em nível mundial nas últimas décadas, sem o desejado planejamento, tem proporcionado, entre outras consequências, o aumento da impermeabilização das superfícies, resultando em aumento do volume escoado superficialmente de água da chuva. A realização de experimentos em bacias de tamanho real, apesar de fornecer a informação exata das variáveis intervenientes (e.g. declividade, área, intensidade de precipitação), não permite o controle das mesmas e, portanto, não se tem repetitividade das informações. Com vista a elaborar estudos da transformação de precipitação-escoamento, desenvolveu-se um simulador de chuvas pressurizado e um modelo físico reduzido, que simula uma bacia hidrográfica urbana impermeabilizada onde é possível controlar a declividade longitudinal e transversal da superfície, montagem inédita no Brasil. Nesse sentido objetivou-se investigar a resposta hidrológica da influência das declividades transversais e longitudinais do terreno, a densidade e altura das edificações no escoamento superficial em áreas urbanas totalmente impermeabilizadas. Grande parte do esforço deste trabalho foi no desenvolvimento e calibração do simulador de chuva, cuja montagem resultou em um coeficiente de uniformidade espacial de 78,63 % e intensidade média de precipitação de 78,82 mm·h<sup>-1</sup>. Foram avaliados 30 cenários com combinações de diferentes declividades, densidade e alturas de edificações. As declividades transversais variaram de 2,5% e 5,0% e as longitudinais em 2,5%, 5,0% e 10,0%. As densidades de edificações variaram de nulas, 15% e 30% da área do modelo e as alturas das edificações variaram em 15 cm e 30 cm. O acréscimo da declividade longitudinal de 2,5% para 5,0%, provocou um aumento de 52,50% no tempo de ascensão do hidrograma e a combinação do cenário de maior adensamento de construções e maior altura dos edifícios provocou aumento no tempo de concentração de 55,00%, sugerindo uma resposta hidrológica mais lenta em função do aumento a altura dos edifícios.

Palavras-chave: Hidrologia urbana. Modelagem física. Simulador de chuva. Hidrograma de cheia.

## ABSTRACT

The increase in urban population has been observed worldwide in recent decades, without the required planning, it has provided, among other consequences, increased waterproofing surfaces, resulting increase in the volume drained rain water surface. The realization of experiments in life-size bowls, despite providing the exact information of the intervening variables (e.g. slope, area, rainfall intensity), does not allow the control of the same and therefore there is no repeatability of information. In order to prepare the transformation of rainfall-runoff studies, we developed a simulator pressurized showers and a reduced physical model, which simulates a sealed urban watershed where you can control the longitudinal and transverse slope of the surface, unprecedented assembly in Brazil. In this sense it was aimed to investigate the hydrological response of the influence of transverse and longitudinal slope of the land, the density and height of buildings in runoff in fully waterproofed urban areas. Much of this research effort was the development and calibration of the rain simulator, whose assembly has resulted in a spatial uniformity coefficient of 78.63% and an average intensity of  $78.82 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  rainfall. A total of 30 scenarios with combinations of different slopes, density and height of buildings. The transverse slopes ranged from 2.5% to 5.0% and longitudinal 2.5%, 5.0% and 10.0%. The densities ranged from zero buildings, 15% and 30% of the template area and the heights of the buildings varied in 15 cm and 30 cm. The addition of the longitudinal slope of 2.5% to 5.0% caused an increase of 52.50% in hydrogram rise time and the combination of the highest density setting constructions and buildings of greater height and an increase of the concentration-time 55.00%, suggesting a slower hydrological response due to the increase the height of buildings.

Keywords: Urban hydrology. Physical modeling Rainfall simulator. Flood hydrograph.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	- Distribuição percentual da população por situação de domicílio – Brasil 1980 a 2010.....	18
Figura 2.2	- Alterações típicas no escoamento, resultantes da pavimentação de superfícies.....	19
Figura 2.3	- Pluviômetro “Ville de Paris”.....	24
Figura 2.4	- Pluviógrafo de boia, balança e cubas basculantes. ....	25
Figura 2.5	- Hidrograma típico.....	29
Figura 2.6	- Semelhança cinemática entre o protótipo e o modelo. ....	31
Figura 2.7	- Representação esquemática do laboratório, incluindo o simulador de chuva e a estrutura de suporte móvel, as conexões para o abastecimento de água, bem como a calha (superfície plano inclinado).....	34
Figura 2.8	- Modelo físico.....	38
Figura 3.1	- Esquema do modelo físico, com declividades longitudinais e transversais.....	43
Figura 3.2	- Esquema de densidade (percentagem de ocupação de edifícios em relação a área total de superfície) e disposição das edificações. ....	44
Figura 3.3	- Configurações das edificações. ....	45
Figura 3.4	- Esquema do simulador de chuvas e reservatório de recolhimento da água.....	46
Figura 3.5	- Bocal FullJet® HH-W ¼, Spraying Systems Co®.....	47
Figura 3.6	- Disposição dos recipientes para a distribuição espacial. ....	48
Figura 3.7	- Esquema dos tempos analisados. ....	51
Figura 4.1	- Curva característica do bocal FullJet® HH-W ¼.....	53
Figura 4.2	- Distribuição espacial da intensidade de precipitação média. ....	54
Figura 4.3	- Hidrograma produzido para um cenário sem edificações, com 2,5% de declividade transversal, variando a declividade longitudinal em 2,5%, 5,0%, e 10,0%. ....	55
Figura 4.4	- Hidrograma produzido para um cenário sem edificações, com 5,0% de declividade transversal, variando a declividade longitudinal em 2,5%, 5,0%, e 10,0%. ....	56
Figura 4.5	- Hidrograma produzido para um cenário sem edificações, com 2,5% de declividade longitudinal, variando a declividade transversal em 2,5% e 5,0%.....	57
Figura 4.6	- Hidrograma produzido para um cenário sem edificações, com 5,0% de declividade longitudinal, variando a declividade transversal em 2,5% e 5,0%.....	58
Figura 4.7	- Hidrograma produzido para um cenário sem edificações, com 10,0% de declividade longitudinal, variando a declividade transversal em 2,5% e 5,0%.....	58

Figura 4.8	- Hidrogramas as declividades longitudinais e transversais, com edificações de 15 cm e taxas de ocupação de 0%,15% e 30%. ....	61
Figura 4.9	- Hidrogramas para todas declividades longitudinais e transversais, com edificações de 30 cm e taxas de 0%,15% e 30%.....	65
Figura 4.10	- Hidrogramas para diferentes declividades longitudinais e transversais, com 15% de edificações e alturas de 15 e 30 cm.....	69
Figura 4.11	- Hidrogramas para diferentes declividades longitudinais e transversais, com 30% de edificações e alturas de 15 e 30 cm.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Precipitação média anual em cidades do mundo selecionadas. ....	21
Tabela 2.2	- Características físicas de alguns tipos de precipitação. ....	22
Tabela 2.3	- Tipos de formadores de gotas desenvolvidos. ....	32
Tabela 3.1	- Característica do bocal FullJet® HH-W ¼ (pressão em bar).....	47
Tabela 3.2	- Matriz de cenários ensaiados.....	50
Tabela 4.1	- Valores dos tempos para um cenário sem edificações, com 2,5% e 5,0% de declividade transversal, variando a declividade longitudinal em 2,5%, 5,0%, e 10,0%. ....	56
Tabela 4.2	- Valores dos tempos para um cenário sem edificação, fixando as declividades longitudinais (2,5%, 5,0% e 10,0%) e variando a declividade transversal em 2,5% e 5,0%. ....	59
Tabela 4.3	- Valores dos tempos para três densidades de ocupação (0%, 15% e 30%), com edificações de 15 cm de altura e declividades de 2,5%×2,5%, 2,5 %×5,0% e 2,5%×10,0%.....	62
Tabela 4.4	- Valores dos tempos para três densidades de ocupação (0%, 15% e 30%), com edificações de 15 cm de altura e declividade de 5,0%×2,5%, 5,0%×5,0% e 5,0%×10,0%.....	63
Tabela 4.5	- Valores da vazão de patamar para três densidades de ocupação (0%, 15% e 30%), com edificações de 15 cm de altura.....	64
Tabela 4.6	- Valores dos tempos para três densidades de ocupação (0%, 15% e 30%), com edificações de 30 cm de altura e declividades de 2,5%×2,5%, 2,5%×5,0% e 2,5%×10,0%.....	66
Tabela 4.7	- Valores dos tempos para três densidades de ocupação (0%, 15% e 30%), com edificações de 30 cm de altura e declividade de 5,0%×2,5%, 5,0%×5,0% e 5,0%×10,0%.....	67
Tabela 4.8	- Valores da vazão de patamar para três densidades de ocupação (0%, 15% e 30%), com edificações de 30 cm de altura.....	68
Tabela 4.9	- Valores dos tempos para as duas alturas de edificações (15 e 30 cm) com uma densidade de ocupação de 15%. ....	70
Tabela 4.10	- Valores da vazão de patamar para as combinações de declividades e alturas de edificações para uma densidade de 15%.....	71
Tabela 4.11	- Valores dos tempos para as duas alturas de edificações (15 e 30 cm) com uma densidade de ocupação de 30%. ....	73
Tabela 4.12	- Valores da vazão de patamar para as combinações de declividades e alturas de edificações para uma densidade de 30%.....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS MAIS RELEVANTES

<b>EPA</b>	- <i>Environmental Protection Agency</i>
<b>LIDS</b>	- <i>Low Impact Development</i>
<b>SUDS</b>	- <i>Sustainable Drainage Systems</i>
<b>WSUD</b>	- <i>Water Sensitive Urban Design</i>
<b>CUC</b>	-Coeficiente de uniformidade de Christiansen (%)
<i>i</i>	-Intensidade média de precipitação ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )
<b>Q<sub>patamar</sub></b>	-Vazão do patamar ( $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ )
<b>tc</b>	-Tempo de concentração (s)
<b>tb</b>	-Tempo de base (s)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
1.1	JUSTIFICATIVA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	14
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	17
2.1	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1.1	Urbanização e cheias	17
2.1.2	Precipitação	20
2.1.2.1	<i>Formação e tipos de precipitações</i>	22
2.1.2.2	<i>Instrumentos de medição</i>	23
2.1.2.3	<i>Precipitações intensas</i>	25
2.1.3	Processo de precipitação-escoamento	26
2.1.3.1	<i>Modelos de precipitação-escoamento</i>	27
2.1.4	Hidrogramas	28
2.1.4.1	<i>Partes constituintes dos hidrogramas</i>	28
2.1.5	Análise dimensional e semelhança	30
2.2	ESTADO DA ARTE	32
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	42
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO MODELO FÍSICO E SIMULADOR DE CHUVA	42
3.1.1	Calibração do simulador de chuva	47
3.1.2	Dimensionamento do reservatório de recolhimento	49
3.2	DELINEAMENTO	50
3.3	ANÁLISE DOS DADOS (HIDROGRAMAS)	51
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	52
4.1	SIMULADOR DE PRECIPITAÇÃO	52
4.1.1	Caracterização do bocal	52
4.1.2	Uniformidade e intensidade média de precipitação do simulador	53
4.1.3	Verificação da conservação de massa	54
4.2	INFLUÊNCIA DA DECLIVIDADE NO HIDROGRAMA	55
4.2.1	Influência da declividade longitudinal	55
4.2.2	Influência da declividade transversal	57
4.3	INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DAS EDIFICAÇÕES NO HIDROGRAMA	60
4.3.1	Influência da densidade das edificações baixas (15 cm)	60
4.3.2	Influência da densidade das edificações altas (30 cm)	64
4.4	INFLUÊNCIA DA ALTURA DO EDIFICADO NO HIDROGRAMA	68

4.4.1	Influência da altura do edificado para uma ocupação de 15% .....	68
4.4.2	Influência da altura do edificado para uma ocupação de 30% .....	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>77</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste tópico serão apresentadas as justificativas e a caracterização do problema, bem como os objetivos deste trabalho. Também, apresenta a forma em que se organizou este trabalho.

### 1.1 JUSTIFICATIVA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Com o crescimento da população urbana, e conseqüentemente, o crescimento de áreas impermeáveis, problemas antes ignorados são prioridades em novas formulações de planos diretores de diversas cidades brasileiras, entre os quais, as cheias urbanas têm particular relevância na atualidade.

A impermeabilização das superfícies naturais contribui significativamente para o aumento do escoamento superficial e a diminuição do tempo de concentração das águas precipitadas na bacia urbana. O resultado dessas alterações é o que se observa com regularidade, em que bairros e áreas significativas de cidades são afetadas provocando enchentes e inundações até mesmo para chuvas com períodos de retorno relativamente baixos. As soluções geralmente encontradas para esses problemas são de caráter emergencial e localizado. As chamadas medidas estruturais, como por exemplo as redes de macro e micro drenagem, simplesmente transferem os volumes precipitados para jusante, muitas vezes concentrando as vazões no tempo e no espaço.

A falta de uma gestão otimizada dos recursos hídricos em conjunto com um planejamento do desenvolvimento, ocasiona, em uma mesma cidade, problemas de inundações graves e escassez de água potável, extremos que ocorrem em um mesmo dia em grandes capitais como São Paulo, por exemplo. Dessa maneira informações e resultados da resposta hidrológica do escoamento superficial em uma área urbana para diferentes cenários de urbanização (adensamento e verticalização), são de extrema importância para um avanço no sistema de gestão das águas pluviais no Brasil.

Diante deste cenário, o estudo e a aplicação de soluções não estruturais ganham impulso, principalmente com o auxílio de ferramentas como a modelagem física e computacional, hidráulicas e hidrológicas.

O uso de modelos matemáticos em hidrologia, e, especialmente, em drenagem urbana, não é recente, vêm da década de 1960, quando os computadores puderam ser utilizados com muitas vantagens, para simular processos hidrológicos. Desde então, os meios técnicos presenciaram o aparecimento de grande número de modelos, do mais simples aos mais complexos.

Modelos teóricos de vazão do escoamento superficial, tal como o modelo racional, levam em consideração a natureza da superfície, a intensidade de precipitação e a área da bacia. Contudo, este modelo não prevê variabilidade espacial do evento de chuva, podendo superestimar o valor de vazão (TUCCI, 2004). De forma geral, este modelo é aplicado em bacias com menor dimensão, visando minimizar o efeito da variabilidade espacial da chuva.

Uma alternativa para uma melhor compreensão dos diferentes arranjos de urbanização, precipitação-escoamento é a utilização de modelos físicos. A simulação em laboratório permite a análise do processo chuva-vazão em um ambiente bem caracterizado, isso permite repetições controladas e conseqüentemente comparáveis além de simulações de cenários diversos em um curto intervalo de tempo, dentre alguns trabalhos de simulação laboratorial, pode-se citar: de Lima e Singh (2003) e De Lima et al. (2003) avaliaram o efeito do movimento de tempestade no escoamento superficial considerando como variáveis a velocidade e direção da tempestade, a jusante ou a montante movimento das tempestades sobre o processo de erosão hídrica. Isidoro et al. (2012) quantificaram o efeito da densidade edifícios em áreas urbanas impermeáveis no processo precipitação-escoamento, sob a chuva com vento e Isidoro e De Lima (2014) utilizaram experimentos de laboratório para estudar a importância do movimento da tempestade e vento no escoamento superficial, para diferentes alturas de construção.

Neste contexto, este trabalho tem a proposta inédita no Brasil, de simular diferentes cenários de adensamento e verticalização para a análise do escoamento superficial em decorrência de chuvas intensas de curta duração. A análise foi realizada em um modelo reduzido de bacia hidrográfica urbana impermeável com área de 8,00 m<sup>2</sup>, com chuva simulada. A montagem experimental permitiu mudanças nas declividades longitudinais e transversais. Os cenários investigados consistem de diferentes alturas e densidades de edificações, medindo-se o hidrograma na saída da bacia para uma precipitação intensa e com distribuição espacial conhecida.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Investigar a influência da densidade e da altura das edificações, e da declividade do terreno, no escoamento superficial em áreas urbanas totalmente impermeabilizadas, através da resposta hidrológica de um modelo reduzido sob chuva simulada.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

Concepção, implantação e calibração de um simulador de chuvas.

Investigar a influência das diferentes alturas e densidades das edificações na forma e picos dos hidrogramas;

Investigar a influência das diferentes declividades, longitudinais e transversais, aplicadas no modelo na forma e picos dos hidrogramas.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho apresenta as seguintes seções:

- Revisão Bibliográfica: dividida em duas partes: Revisão da Literatura com conceitos da hidrologia e drenagem urbana; E Estado da Arte, que reúne trabalhos relevantes em simulação de chuvas e modelagem física de bacias urbanas.
- Materiais e Métodos: discorre sobre as metodologias empregadas em cada etapa do estudo;
- Resultados e Discussões: apresenta e discute os resultados obtidos;
- Conclusões e Desenvolvimentos Futuros: apresenta as conclusões e recomendações para possíveis pesquisas futuras;
- Referências Bibliográficas: indica as obras utilizadas como fonte de pesquisa;
- Anexos: fotos, dados de ensaios e procedimentos de cálculo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para uma melhor organização da dissertação, a revisão bibliográfica foi dividida em duas partes: o Referencial Teórico contendo os conceitos básicos e referências clássicas da hidrologia e drenagem urbana; E o Estado da Arte, contendo um panorama de trabalhos importantes publicados na área de simulação de chuva e modelagem física.

### 2.1 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 2.1.1 Urbanização e cheias

Com a crise econômica mundial, em 1930, a dinâmica demográfica mudou suas características e contingentes populacionais significativos dirigiram-se para as áreas urbanas. Essa situação se agravou nas décadas seguintes com a aceleração do crescimento populacional e o desenvolvimento industrial e tecnológico extraordinários.

Nos países em desenvolvimento, dentre os quais inclui-se o Brasil, a industrialização foi tardia, assim como o fenômeno da urbanização, que teve início em meados do século XX. Na década de 1970, a modernização acelerou o processo de expansão urbana, que vem ocorrendo até hoje de forma insustentável e trazendo consequências para o espaço urbano (COLLODEL, 2009).

A Figura 2.1 apresenta a expansão da população urbana e a consequente diminuição da população rural brasileira entre os anos de 1980 a 2010, ano do último censo demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

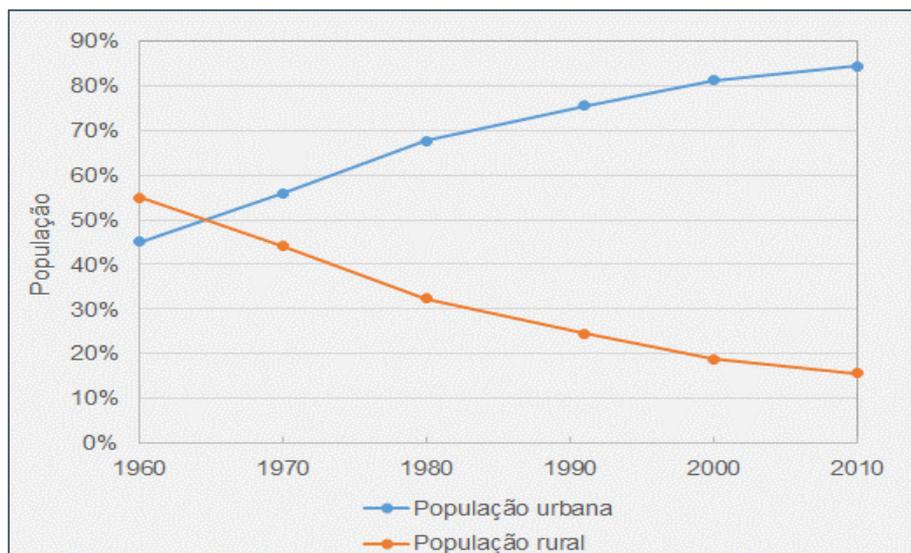


Figura 2.1 - Distribuição percentual da população por situação de domicílio – Brasil 1960 a 2010.

Fonte: Adaptado de IBGE, [2010].

Durante muitos anos, tanto no Brasil como em outros países, a drenagem urbana das grandes metrópoles foi abordada sem considerar a realidade das grandes cidades, como por exemplo o aumento populacional e o zoneamento urbano. O aumento da população e o conseqüente acréscimo de solo impermeável trouxeram problemas, que são tratados de forma pontual e raramente se faz uma abordagem geral ou um planejamento adequado; Problemas, como por exemplo, as enchentes e transbordamentos dos rios, são transferidos para jusante sem solução definitiva. (CANHOLI, 2005).

A *United States Environmental Protection Agency*, (EPA) descreve que a urbanização altera de forma consistente e penetrante o fluxo dos córregos urbanos. Pode-se incluir alguns aspectos como: A diminuição da infiltração associada às superfícies impermeáveis, causa o aumento do escoamento superficial; O aumento da velocidade de fluxo, que evidencia a falta de infraestrutura e a não eficiência dos sistemas de drenagem pluviais; A diminuição da evapotranspiração devido à remoção da vegetação; O aumento das descargas diretas de águas servidas (águas residuais e efluentes industriais). A Figura 2.2 demonstra que o aumento da proporção de áreas pavimentadas diminui os caminhos de infiltração e evapotranspiração da precipitação, aumentando assim a quantidade desta precipitação que escoar de uma área na forma de escoamento.

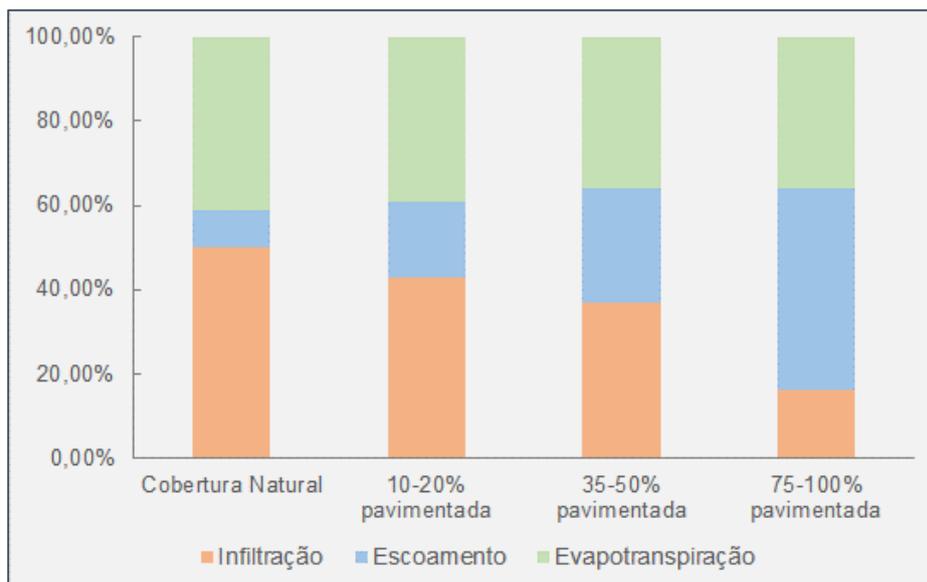


Figura 2.2 - Alterações típicas no escoamento, resultantes da pavimentação de superfícies.

Fonte: Adaptado de Shammass; Wang (2013).

Souza et al. (2012) evidenciam três fases no manejo das águas pluviais nas cidades brasileiras. A primeira, no início do século XX, onde as práticas de saneamento consistiam no afastamento dos efluentes, o mais rápido e para mais longe possível. Com essas práticas, a degradação dos corpos d'água, danos culturais e econômicos, foram percebidos. Sendo assim, no final dos anos 1960, inicia-se a segunda fase, com investimentos em práticas como o tratamento de esgoto e no controle das águas pluviais, através de sistemas de armazenamento entraram em operação. A última fase ocorre no final da década de 1990, onde a ciência passou a reconhecer o papel do solo e da vegetação (sistemas naturais de drenagem) no controle quali-quantitativo de águas pluviais, ao promover a infiltração, a evapotranspiração e o contato da água com bactérias e plantas.

Shammass e Whang (2013) afirmam que o controle e planejamento, desde que com uma boa relação custo-benefício, são o foco para a gestão do escoamento, seja através do balanceamento do escoamento, dos usos múltiplos de instalações, do retardamento do escoamento ou de combinações disso tudo.

Pode-se citar sistemas que mostram boas práticas sustentáveis, como a prática americana de *Low Impact Development* (LID), no Brasil denomina-se “Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto”, a abordagem australiana de *Water*

*Sensitive Urban Design* (WSUD) e a abordagem britânica de *Sustainable Drainage Systems* (SuDS).

LID é considerada uma prática sustentável na gestão de águas pluviais pela *Water Environment Research Foundation*, e é um conceito e um padrão para descrever um planejamento urbano e de engenharia para gerenciar o escoamento de águas pluviais o mais próximo da fonte possível. Desenvolvido pela EPA, LID emprega princípios como a preservação e recriação de elementos naturais da paisagem, a eficácia de um local de drenagem funcional e atraente, a diminuição da impermeabilidade e tratamento das águas pluviais com um recurso e não um produto de resíduos (*Managing Wet Weather with Green Infrastructure*).

Para chuvas urbanas muitas práticas têm sido usadas para aderir a esses princípios, tais como instalações bioretentoras, telhados com vegetação, coletores de chuva, fundações verdes e pavimentos permeáveis. Com a implementação de princípios e práticas LID, WSUD ou SuDS, a água pode ser gerida de uma forma que reduz o impacto das localidades no sistema hidrológico e promove o movimento natural da água dentro de um ecossistema ou bacia hidrográfica.

### 2.1.2 Precipitação

A precipitação é entendida em hidrologia como toda a água proveniente do vapor de água da atmosfera depositada na superfície terrestre em forma de neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve (SOUSA PINTO. et al, 1976).

As precipitações representam, no ciclo hidrológico, o importante papel de elo de ligação entre os fenômenos meteorológicos propriamente ditos e os do escoamento superficial, de interesse maior aos engenheiros. Deriva daí, sobretudo, a importância do estudo das precipitações (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

Segundo Cech (2013), a evaporação dos oceanos representa 90% da precipitação da Terra, porém, não significa que regiões litorâneas estão sujeitas a mais chuva, isso depende de fatores como temperatura, umidade e pressão atmosféricas.

A Tabela 2.1 apresenta a precipitação média anual em cidades do mundo selecionadas por conterem uma amplitude nos volumes anuais. Observa-se que

regiões como Cairo, Ahmadi e Damasco, mesmo cortadas pelos Rios Tigre, Eufrates e Nilo, são regiões áridas e apresentam volumes muito baixos de precipitação média anual, inferiores a 200 mm.

Tabela 2.1 - Precipitação média anual em cidades do mundo selecionadas.

<b>CIDADE</b>	<b>VOLUME</b>
<i>Cairo, Egito</i>	25
<i>Ahmadi, Kuwait</i>	99
<i>Riyadh, Arábia Saudita</i>	112
<i>Damasco, Síria</i>	188
<i>Mcmurdo, Antártica</i>	203
<i>Teerã, Irã</i>	241
<i>Amã, Jordânia</i>	272
<i>Madri, Espanha</i>	439
<i>Praga, República Tcheca</i>	480
<i>São Petesburgo, Rússia</i>	538
<i>Londres, Inglaterra</i>	589
<i>Paris, França</i>	607
<i>Beijing, China</i>	635
<i>Nairobi, Quênia</i>	759
<i>Roma, Itália</i>	792
<i>Reykjavik, Islândia</i>	818
<i>Johannesburgo, África Do</i>	846
<i>Perth, Austrália</i>	866
<i>Montreal, Quebec</i>	1036
<i>Rio De Janeiro, Brasil</i>	1102
<i>Brazzavile, Congo</i>	1372
<i>Tóquio, Japão</i>	1524
<i>Yaounde, Camarão</i>	1598
<i>Jacarta, Indonésia</i>	1821

Fonte: NCDC-NOAA (2015)

### 2.1.2.1 Formação e tipos de precipitações

Segundo Reis, et al. (2012) o processo de precipitação consiste no retorno da água dissolvida na atmosfera para a superfície terrestre na forma líquida (chuva) ou sólida (neve, granizo). Ainda segundo os autores, o processo de condensação ocorre sob condições apropriadas de temperatura, umidade e pressão atmosférica.

A temperatura e pressão ambientes são fatores preponderantes para a concentração do vapor de água da atmosfera, já a umidade relativa do ar, corresponde à relação entre a pressão parcial de vapor de água e a pressão de vapor do ar saturado em que o ar atinge a máxima capacidade de retenção de vapor de água. O resfriamento do ar ocorre normalmente pela subida da massa de ar e conseqüente redução da pressão atmosférica (processo adiabático), propiciando a condensação do vapor de água e formação das nuvens.

Quando a umidade da atmosfera se torna muito grande, ocorre um aumento de massa da gota, impedindo que ela permaneça em suspensão nas nuvens, rompendo então a força gravitacional e ocorrendo a precipitação. Dessa maneira, a origem e o tipo das precipitações está intimamente ligada ao crescimento das gotículas nas nuvens (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Características físicas de alguns tipos de precipitação.

<b>Tipo de precipitação</b>	<b>Intensidade (mm·h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Diâmetro médio das gotas (mm)</b>	<b>Velocidade de queda para os diâmetros médios (m.s<sup>-1</sup>)</b>
<i>Nevoeiro</i>	0,25	0,2	-
<i>Chuva leve</i>	1 a 5	0,45	2,0
<i>Chuva forte</i>	15 a 20	1,5	5,5
<i>Tempestade</i>	100	3,0	8,0

Fonte: Mello; Silva (2013).

Segundo Mello e Silva (2013) a ascensão das massas de ar, além do mecanismo que a produz e o do meio físico, são fatores intervenientes, que classificam as precipitações em três tipos: Ciclônicas, Orográficas e Convectivas.

As precipitações ciclônicas podem ser do tipo não frontal, sem grande ocorrência no Brasil e frontais, aquelas que ocorrem ao longo da linha de descontinuidade, separando duas massas de ar de características diferentes.

As precipitações orográficas resultam da ascensão mecânica de massas de ar úmida sobre barreiras naturais, como montanhas. Segundo Mello e Silva (2013), apresentam alta intensidade e ocorrem principalmente na região litorânea.

E por fim, as precipitações convectivas são aquelas provocadas pela ascensão de ar devida às diferenças de temperatura na camada vizinha da atmosfera. Segundo Sousa Pinto et al. (1986), são conhecidas como tempestade ou trovoadas, que tem curta duração e são independentes das “frentes” e caracterizadas por fenômenos elétricos, rajadas de vento e forte precipitação.

#### 2.1.2.2 Instrumentos de medição

Exprime-se a quantidade de chuva pela altura de água caída e acumulada sobre uma superfície plana e impermeável. Ela é avaliada por meio de medidas executadas em pontos previamente escolhidos, utilizando-se aparelhos chamados pluviômetros ou pluviógrafos, conforme sejam simples receptáculos da água precipitada ou registrem essas alturas no decorrer do tempo. Tanto um como outro colhem uma pequena amostra, pois têm uma superfície horizontal de exposição de 500 cm<sup>2</sup> e 200 cm<sup>2</sup>, respectivamente, colocados a 1,50 m do solo (SOUSA PINTO. et al, 1976).

- a) Pluviômetro:** o pluviômetro é um aparelho dotado de uma superfície de captação horizontal que permite medir o volume de água precipitado durante um determinado período de tempo. O pluviômetro mais utilizado no Brasil é o tipo *Ville de Paris* (Figura 2.3) que possui uma área de captação de 400 cm<sup>2</sup>, o que significa que quando acumulado um volume de 40 ml, ter-se-á 1 mm de precipitação (Agência Nacional das Águas, 2009).



Figura 2.3 - Pluviômetro “Ville de Paris”.

Fonte: Brasil (2009, p.18).

As leituras feitas pelo observador do pluviômetro, normalmente em intervalos de 24 horas, em provetas graduadas, são anotadas em cadernetas próprias que são enviadas à agência responsável pela rede pluviométrica todo fim de mês. Elas se referem quase sempre ao total precipitado das 7 horas da manhã do dia anterior até às 7 horas do dia em que se fez a leitura.

**b) Pluviógrafo:** Os pluviógrafos são capazes de registrar a precipitação continuamente de forma analógica ou digital. Os aparelhos de registro analógico possuem um mecanismo que registra graficamente a chuva acumulada. Os tipos mais usuais deste grupo são: o de boia, balança e cubas basculantes (Figura 2.4). Já os pluviógrafos com registro digital armazenam os eventos em *data logger*, aparelhos com capacidade de memória variável capazes de armazenar as informações em intervalos de tempo previamente determinados.



Figura 2.4 - Pluviógrafo de boia, balança e cubas basculantes, respectivamente.

Fonte: Agência Nacional das Águas (2009, p.19).

Os dados são coletados com o uso de computadores ou podem ser transmitidos remotamente por meio de satélite, telefonia ou rádio quando o equipamento dispõe de uma destas tecnologias acoplada (BRASIL, 2009).

Os pluviogramas obtidos nos pluviógrafos fornecem o total de precipitação acumulado no decorrer do tempo e apresentam grandes vantagens sobre os medidores sem registro, sendo indispensáveis para o estudo de chuvas de curta duração.

### 2.1.2.3 *Precipitações intensas*

Segundo Garcez e Alvarez (1988), precipitações intensas são “o conjunto de chuvas originadas de uma mesma perturbação meteorológica cuja intensidade ultrapasse um certo valor (chuva mínima)”. A duração dessas precipitações varia de alguns minutos até algumas dezenas de horas (30 horas) e a área atingida pelas precipitações pode variar de alguns poucos quilômetros (chuvas de convecção) até milhares de quilômetros quadrados (chuva tipo frontal).

Em Tucci (2004), as precipitações intensas são retratadas pontualmente pelas curvas de intensidade, duração e frequência (i-d-f), onde verifica-se que, quanto mais intensa for a precipitação, menor será sua duração. A relação cronológica das maiores

intensidades para cada duração pode ser obtida de uma série de registros pluviográficos de tormentas intensas. Da mesma forma, quanto menor for o risco, maior será a intensidade. A função  $i=f(t,p)$ , onde  $i$ = intensidade,  $t$ = duração,  $p$ =probabilidade, é determinada com base nos dados dos pluviógrafos do local de interesse ou estimada com base nos dados dos postos vizinhos.

Cech (2013) aborda as precipitações intensas, através do conceito da Precipitação Máxima Provável (PMP), que consiste na altura máxima (quantidade) de precipitação que é razoavelmente possível durante um único evento de tempestade e se baseia nos registros anteriores de tempestade, no conhecimento meteorológico aceito, na probabilidade e na estatística.

A PMP não é um conceito atual, é definida em 1973 pela *World Meteorological Organization* como a maior coluna pluviométrica correspondente a uma dada duração, fisicamente possível de ocorrer, sobre uma dada área de drenagem em uma dada época do ano. Esta metodologia é mais utilizada para grandes obras onde o risco de rompimento deve ser o mínimo.

### 2.1.3 Processo de precipitação-escoamento

Segundo Garcez e Alvarez (1988) o escoamento superficial é a fase do ciclo hidrológico que trata do conjunto das águas que, por efeito da gravidade, se desloca na superfície da terra. O estudo do escoamento superficial engloba, portanto, desde a simples gota de chuva que tomba sobre o solo, saturado ou impermeável, e escorre superficialmente, até os grandes cursos de água que desembocam no mar. O escoamento é regido por leis físicas e representado quantitativamente por variáveis como vazão, profundidade e velocidade.

Em Sousa Pinto et al. (1976) a ocorrência do escoamento superficial pode ser descrita, como originário das precipitações, onde uma parte das chuvas é interceptada pela vegetação e outros obstáculos, de onde se evapora posteriormente. Do volume que atinge a superfície do solo, parte é retida em depressões do terreno, parte se infiltra e o restante escoar pela superfície logo que a intensidade da precipitação supere a capacidade de infiltração no solo e os espaços nas superfícies retentoras tenham sido preenchidos. No início do escoamento superficial forma-se uma película laminar

que aumenta de espessura, à medida que a precipitação prossegue, até atingir em estado de equilíbrio.

Mello e Viola (2012) afirmam que, a análise da precipitação e consequente escoamento superficial, é um dos produtos mais importantes da engenharia de conservação do solo e da água. A aplicação dessa análise está associada ao dimensionamento de obras hidráulicas para controle de cheias, drenagem urbana e do solo, modelagem e controle da erosão em áreas com agricultura intensificada, manejo conservacionista do solo e mapeamento de áreas com maior potencial para ocorrência de erosão do solo e inundações.

### 2.1.3.1 Modelos de precipitação-escoamento

O escoamento superficial é a parcela do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície da bacia até encontrar uma calha definida. Quando a bacia é rural e possui cobertura vegetal, o escoamento sofre a interferência desta cobertura e grande parte dele se infiltra. O escoamento em bacias urbanas é regido pela interferência do homem através de superfícies impermeáveis e sistemas de esgotos pluviais. Pode-se dizer, portanto, que o escoamento superficial é a combinação do fluxo de pequena profundidade na superfície com escoamento em pequenos canais que constituem a drenagem da bacia hidrográfica. (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

Segundo Tucci (2004) os modelos usualmente utilizados para representar o escoamento superficial têm sido classificados em lineares e não lineares e, em empíricos e conceituais.

- a) Modelos lineares e não lineares:** um modelo é matematicamente linear quando a equação diferencial do mesmo é linear. A equação diferencial (2.1) é linear quando os coeficientes  $A_0, A_1, \dots, A_n$  são independentes de  $x$  e linear invariante quando os coeficientes referidos são também independentes de  $t$ . O modelo é não-linear quando pelo menos um dos coeficientes depende de  $x$ .

$$A_n \frac{d^n x}{dt^n} + A_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + A_1 \frac{dx}{dt} + A_0 x = y(t) \quad (2.1)$$

**b) Modelos empíricos e conceituais:** um modelo é dito conceitual quando as funções utilizadas na sua elaboração (*black box*) utilizam-se de funções empíricas que não estão relacionadas com os fenômenos físicos, mas permitem retratar a saída do sistema em função da entrada.

#### 2.1.4 Hidrogramas

Segundo Mello e Silva (2013, p. 346), pode-se definir os hidrogramas (ou hidrógrafas) da seguinte maneira:

“Hidrógrafas são representações gráficas contínuas da vazão de um curso d’água ao longo do tempo, sendo possível extrair, de forma aproximada, a parcela do escoamento superficial direto e do escoamento de base.”

Segundo Tucci (2004) a forma do hidrograma depende de um grande número de fatores, os mais importantes são: Relevo; Cobertura da bacia; Modificações artificiais no rio; Distribuição, duração e intensidade da precipitação e Solo.

Além dos fatores físicos da bacia, o tipo de precipitação que ocorreu interfere nas características do hidrograma. Precipitações uniformes sobre toda a bacia correspondem a hidrogramas com pico suave em relação ao hidrograma resultante de uma chuva concentrada próxima ao exutório ou à seção, onde são observados picos de vazões.

##### 2.1.4.1 Partes constituintes dos hidrogramas

Um hidrograma típico após um evento de precipitação é apresentado na Figura 2.5. Verifica-se um intervalo de tempo para o início do escoamento, esse retardo de resposta se deve a fatores como a interceptação vegetal e depressões no solo, além do próprio tempo de resposta da bacia hidrográfica. O hidrograma atinge o máximo e

apresenta a seguir a recessão, onde se observa um ponto de inflexão que caracteriza o final do escoamento superficial e a continuação do escoamento de base.

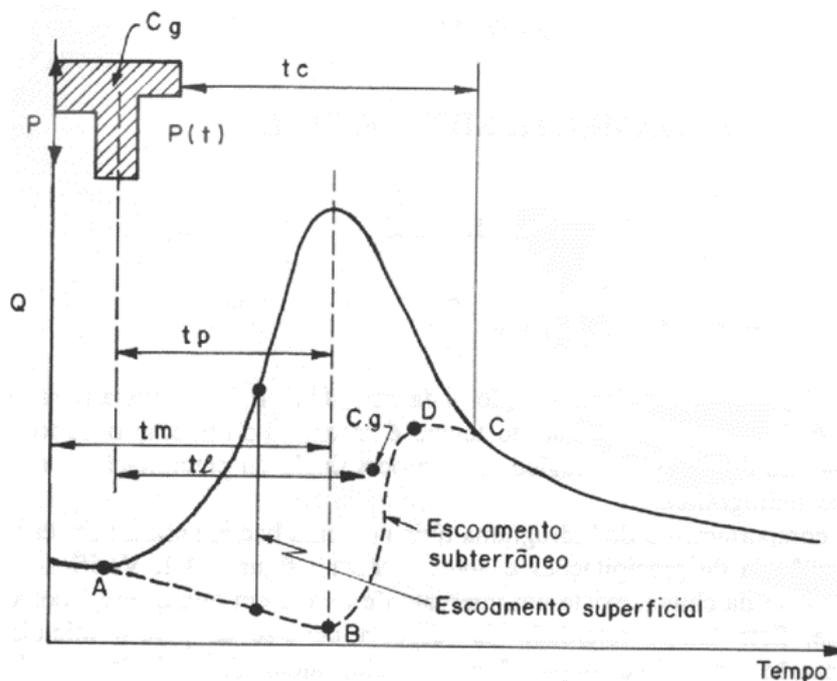


Figura 2.5 - Hidrograma típico.

Fonte: Tucci (2004, p.392).

Alguns valores importantes da abcissa podem ser retirados de um hidrograma como: Tempo de retardo ( $t_l$ ) definido como o intervalo de tempo entre o centro de massa da precipitação e o centro de gravidade do hidrograma; Tempo de pico ( $t_p$ ) definido como o intervalo entre o centro de massa da precipitação e o tempo de vazão máxima; Tempo de concentração ( $t_c$ ), definido como o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais remoto na bacia, deslocar-se até a seção principal; Tempo de ascensão, é o tempo entre o início da chuva e o pico do hidrograma; Tempo de base, é o tempo entre o início da precipitação e aquele em que a precipitação ocorrida já escoou através da calha principal e o Tempo de recessão, definido como o tempo necessário para a vazão baixar até o ponto de final do escoamento superficial.

Segundo Righetto (1998), o período de ascensão do hidrograma, reflete o grau de permeabilidade da bacia e a sua capacidade de transporte via escoamento superficial. Para área relativamente impermeáveis e com alta declividade, verifica-se que o tempo de ascensão do hidrograma é bastante curto, refletindo a capacidade de resposta da bacia. Por outro lado, para bacias permeáveis, alongadas e de baixa

declividade, o período de ascensão é bastante longo, observando-se vazões de pico relativamente baixas e variações suaves do hidrograma nos períodos de ascensão, de pico e de recessão.

#### 2.1.5 Análise dimensional e semelhança.

Segundo Brunetti (2008), a resolução de problemas hidráulicos por métodos puramente analíticos muitas vezes é trabalhosa e difícil, e às vezes impossível, devido ao grande número de variáveis envolvidas. Por esta razão têm-se desenvolvido métodos experimentais que permitem, nesses problemas, produzir modelos matemáticos condizentes com a realidade. A análise dimensional é uma teoria matemática que aplicada à Física, e especificamente a Mecânica dos Fluidos, permite tirar maiores proveitos dos resultados experimentais, assim como racionalizar a pesquisa e, portanto, diminuir-lhe o custo e as perdas de tempo.

A teoria da semelhança, ou teoria dos modelos, é baseada em princípios abordados pela análise dimensional e resolve certos problemas através da análise de modelos a uma escala conveniente ao fenômeno em estudo. Uma das formas de simplificar as pesquisas é a construção de um modelo em escala que simula as condições do fenômeno em escala real, que será chamado de protótipo.

Para que os resultados das grandezas medidas no modelo tenham valor prático em relação ao protótipo, certas condições devem ser cumpridas:

- a)** Entre o modelo e o protótipo deve existir semelhança geométrica, isto é, o modelo e o protótipo podem ter dimensões diferentes, mas devem ter o mesmo formato. As suas dimensões correspondentes deverão ser proporcionais;
- b)** Entre o modelo e o protótipo deve existir semelhança cinemática, isto é, as velocidades das partículas de fluido homólogas devem manter uma relação constante (Figura 2.6);

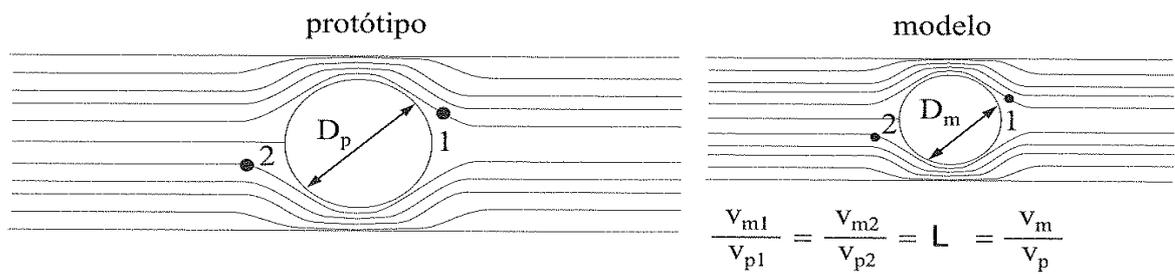


Figura 2.6 - Semelhança cinemática entre o protótipo e o modelo.

Fonte: Brunetti (2008).

- c)** Entre o modelo e o protótipo deve existir semelhança dinâmica, isto é, as forças que agem em pontos homólogos deverão manter relações constantes.

Para que todas essas condições sejam obtidas, verifica-se que os adimensionais referentes ao protótipo devem ser iguais aos respectivos adimensionais referentes ao modelo. Se, por construção, essa igualdade é conseguida, diz-se que o fenômeno referente ao protótipo e o referente ao modelo mantêm uma semelhança completa.

## 2.2 ESTADO DA ARTE

Simuladores de precipitação e modelos em escala reduzida em laboratório possibilitam a análise dos resultados em um ambiente bem caracterizado, isso permite repetições controladas, conseqüentemente, comparáveis e a possibilidade de efetuar simulações em cenários diversos.

Na fase inicial de desenvolvimento dos simuladores de chuva, técnicas diversas foram desenvolvidas, algumas são citadas por Pall et al. (1983) e apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Tipos de formadores de gotas desenvolvidos.

<b>Técnica</b>	<b>Pesquisadores</b>	<b>Ano</b>
<i>Fios pendurados</i>	Barnes e Costel	1957
<i>Tubos capilares de vidro</i>	Adams, et al.	1957
<i>Tubos de metal</i>	Mutchler e Moldenhauer	1963
	Gabriels e DeBoodt	1975
<i>Agulhas hipodérmicas</i>	Romkens, et al.	1975
	Walker, et al.	1977
<i>Polietileno e tubos de plástico</i>	Chow e Harbough	1965
	Chow e Yen	1974
	Kinnell	1974

Fonte: Adaptado de Pall et al. (1983)

Pall et al. (1983) desenvolveram um sistema de simulador de precipitação e apresentaram uma metodologia de calibração do mesmo. O simulador de precipitação era composto por uma grande abertura angular do bocal, de grande capacidade e um disco rotativo com múltiplas aberturas variáveis, utilizado para a intercepção do pulverizador. Testes de calibração mostram que a intensidade da chuva simulada e a uniformidade de aplicação são afetados pelo ângulo de abertura, a pressão do bocal, a velocidade angular do disco e a interação de pressão do bocal e o ângulo de abertura, tendo este último um maior efeito sobre a intensidade. A pressão no bocal demonstra o efeito mais significativo sobre a uniformidade de chuva simulada. A

uniformidade da distribuição de um pequeno lote é também afetada pelo tamanho das unidades de coletores considerados na determinação do coeficiente de uniformidade. Para as combinações selecionadas da pressão do bico, ângulo de abertura, e a velocidade angular do disco, a intensidade de chuva simulada e a uniformidade de distribuição pode ser representado por um modelo linear envolvendo as dimensões da trama, de comprimento e largura.

Neto et al. (1986) analisaram a influência que a pressão de serviço faz sobre a intensidade e a uniformidade de precipitação, além de determinar o local mais apropriado para a instalação do manômetro no sistema do simulador de chuva utilizado. Os ensaios foram feitos em um simulador de chuva de braço rotativos da marca *Perrot* em duas séries, com 15 e 30 bocais *VeeJet* 80.100, diferenciando as pressões de serviço de modo a obter uma intensidade de precipitação de 60 e 120 mm·h<sup>-1</sup> para cada bico, respectivamente. Foram instalados manômetros em três posições diferentes. Para cada combinação, foram repetidas 2 precipitações. Foram distribuídos pela área do ensaio (38,5 m<sup>2</sup>) 96 pluviômetros. Concluiu-se que a relação entre a pressão de serviço e a intensidade e uniformidade da precipitação é de extrema importância. Para obter as intensidades de precipitação desejadas para cada quantidade de bocais, obteve-se como a pressão ideal de serviço o valor de 72 lbf·pol<sup>-2</sup>. A melhor localização para o manômetro foi no braço do simulador e o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) obtido foi de 94%. Observou-se também que somente para uma faixa de valores de pressão de serviço o CUC é satisfatório, visto que para baixas e altas pressões o CUC não é bom.

Montebeller *et al.* (2001) avaliaram um simulador de chuva através do diâmetro médio de gotas, da intensidade de precipitação e da uniformidade de distribuição a partir do CUC, variando bocais e pressão de serviço. O teste da farinha foi utilizado para determinar o diâmetro médio de gotas. Esse teste consiste em bandejas com farinha de trigo que ficam expostas a uma precipitação de duração de cerca de 3 a 4 segundos, com jatos a 0,20 m da superfície. Após secadas ao ar por 24 horas os grânulos são separados e pesados e através de uma expressão matemática, calcula-se o diâmetro da gota. Após realizado o teste de diâmetro médio de gotas, foi utilizado um programa computacional, para se avaliar a relação entre a energia cinética da chuva simulada pelo equipamento e a energia da chuva natural. O simulador de chuva utilizado apresentou comportamento satisfatório perante as variáveis definidas, sendo

a melhor combinação obtida para o bocal *VeeJet* 80.150, com uma pressão de serviço superior a 27,2 kPa gerando uma precipitação inferior a  $160 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  e um CUC superior a 80%.

De Lima e Singh (2003) avaliaram o efeito do movimento de tempestade no escoamento superficial considerando como variáveis a velocidade e direção da tempestade, a jusante ou a montante. Foi utilizado um simulador de chuva móvel do tipo aspersão disposto sobre uma superfície impermeável de área  $6,25 \text{ m}^2$  com uma declividade de 5% (Figura 2.7), em que o escoamento era monitorado por um sistema de gravação, através de um transdutor de pressão acoplado a um *datalogger*, que armazenava o nível da água possibilitando, posteriormente, a geração do hidrograma. Foram obtidas diferenças consideráveis em volumes escoados e nos picos dos hidrogramas para as chuvas que se movimentaram nas diferentes direções e velocidades. Comparando os resultados para os diferentes cenários de precipitação, a movimentação para montante possui um hidrograma com crescimento mais cedo, uma vazão de pico menor e um tempo de base mais longo do que quando a movimentação é para jusante. Independentemente da direção da tempestade, a vazão de pico é maior quando a velocidade da tempestade e a velocidade média do escoamento superficial são iguais.

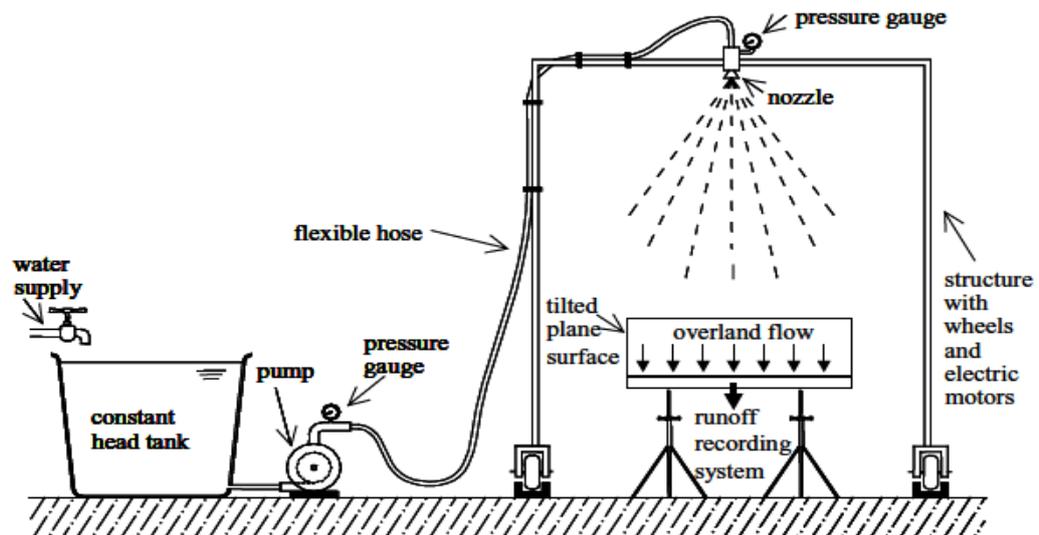


Figura 2.7 - Representação esquemática do laboratório, incluindo o simulador de chuva e a estrutura de suporte móvel, as conexões para o abastecimento de água, bem como a calha (superfície plano inclinado).

Fonte: De Lima; Singh (2003, p.278).

De Lima et al. (2003) estudaram o efeito do movimento das tempestades sobre o processo de erosão hídrica. Os experimentos foram realizados utilizando uma calha com solo, ajustável para diferentes inclinações e um simulador de chuva tipo aspersão móvel. Para simular as tempestades que se deslocam, o simulador de chuva se movia para montante e para jusante sobre a superfície do solo. Os resultados mostraram que a direção e velocidade da tempestade afetam fortemente o processo de erosão hídrica. A perda de solo causada pelas tempestades que se deslocam para jusante é maior do que a causada pela chuva idêntica de movimento para montante. Estes resultados de perda de solo, são claramente ligadas as características dos hidrogramas resultantes. Os resultados também revelaram que a velocidade da tempestade afeta volumes de escoamento superficial e, conseqüentemente, a perda de solo associada.

Campana et al. (2009) estudaram o controle do escoamento superficial em superfícies permeáveis a partir de chuvas artificiais com diferentes intensidades sobre parcelas de 1 m<sup>2</sup> de blocos de concreto maciços e vazados e solo exposto e gramado. Observou-se como variáveis experimentais o aporte de sedimento sobre a superfície, a submissão à passagem de carros, diferentes declividades longitudinais e o estado de compactação do substrato. O simulador de chuva constitui-se de 22 bocais dispostos há 1,5 m do solo. Nos testes obtiveram-se intensidades de precipitações entre 50 e 180 mm·h<sup>-1</sup> com um CUC praticamente constante de 90%, sendo estes diretamente proporcionais. Como resultado, observou-se que a opção mais eficiente para controlar o escoamento são os blocos vazados, visto que há uma maior área de infiltração. Já com os blocos maciços com pouca declividade contribui significativamente para a redução do escoamento desde que não haja sedimentos sobre a superfície e compactação da base.

Cea et al. (2010) realizaram a validação de modelos para a previsão de chuva-vazão em área urbanas, em diversas geometrias urbanas simplificadas que foram testados em um simulador de precipitação laboratorial. Foi verificado que a relação entre os resultados experimentais e numéricos é muito boa para chuva intermediária e de alta intensidade. Para a menor taxa de precipitação, o acordo é um pouco mais pobre, devido à tensão superficial e efeitos laminares (efeitos de escala).

Fister et al. (2011) analisaram as características do vento e da chuva de um simulador e avaliaram se a sua qualidade e reprodutibilidade era adequada para

estudos comparativos de erosão do solo no campo. O túnel de vento foi baseado no trabalho de Fister e Ries (2009), onde utilizaram o equipamento, para seu estudo de campo sobre erosão eólica na bacia central do Ebro. A análise apresentada neste estudo sugere muito boa reprodutibilidade das condições de vento e chuva. O simulador deve, portanto, ser um instrumento útil para comparar medições de erosão do solo no campo e apoiar a recolha de dados quantitativos sobre a importância relativa das taxas de desagregação do solo entre erosão eólica e hídrica, bem como a pluviosidade sem vento e levada pelo vento.

Souza Júnior e Siqueira (2011) projetaram, construíram, calibraram e avaliaram a precipitação de um simulador para pesquisa em hidrologia urbana, utilizando o bocal *FullJet 1/2 HH SS 40*. O simulador foi projetado para atender aos requisitos: (1) a portabilidade, montagem e operação fácil; (2) distribuição de tamanho de gotas terminais, velocidade e energia cinética semelhante à precipitação natural; (3) capacidade de gerar um intervalo de precipitação e intensidades semelhantes aos observados no Estado de Goiás; (4) capacidade de aplicar chuvas uniformemente sobre uma área de terreno. O simulador desenvolvido foi capaz de simular eventos com gotas de chuva de diâmetro médio ( $D_{50}$ ) de 2,12 mm e energia cinética de 22,53 J/mm·m<sup>2</sup>, o que representa 90,12% da energia cinética de eventos de chuva natural. A distribuição espacial da chuva simulada, expressa pelo CUC, variou 68,3 a 82,2%. O simulador projetado foi capaz de simular intensidades de precipitação de 40 mm·h<sup>-1</sup> a 182 mm·h<sup>-1</sup>. Esta gama abrange intensidades de precipitação de 1 a 10 anos de período de retorno e duração até 60 minutos, estimado pela equação IDF local para a cidade de Goiânia, Estado de Goiás, cidade de desenvolvimento da pesquisa.

Aksoy et al. (2012) desenvolveram um simulador de chuva em escala laboratorial para avaliar a qualidade e reprodutibilidade do mecanismo para transportes de sedimentos, sobre uma calha de erosão com inclinação bidimensional de até 20% em ambos os lados, com dois pontos de recolha do fluxo. O desempenho do simulador de chuva foi avaliado a partir da intensidade de precipitação e sua homogeneidade, distribuição de tamanho de gotas de chuva, de velocidades terminais e de impacto e da energia cinética da chuva gerada. A série de bocais pressurizados *VeeJet* foram utilizados para pulverizar água sobre a calha, instalados a 2,43 m de altura. Foram obtidos pingos de chuva com diâmetro médio de 2,2 a 3,1 mm e intensidades variando de 45 a 105 mm·h<sup>-1</sup> e alterações de CUC de 82 a 89%. A

experiência resultou em hidrogramas e a sedimentação tipicamente observados em condições naturais. Isto mostra a habilidade de o simulador de chuva para uso em processos de transporte de sedimentos de encostas.

Isidoro et al. (2012) quantificaram o efeito da densidade edifícios em áreas urbanas impermeáveis no processo precipitação-escoamento, sob a chuva com vento. Os experimentos foram realizados utilizando um modelo de escala 1:100, com elevada densidade de urbanização com arranha-céus e um simulador de chuva. 72 combinações foram realizadas de tempestades estáticas e tempestades se movendo em direções de aclave e declive, com e sem vento, para diferentes densidades de construção e para uma intensidade média de chuva de  $120 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ . Os resultados mostraram que, a densidade de construção e a distribuição temporal e espacial das chuvas resultante de vento e movimento de tempestade, têm uma influência clara sobre a resposta hidrológica. O aumento da urbanização promove uma vazão de pico mais elevado, enquanto a chuva com vento atenua esses efeitos. O movimento de declive da tempestade promove uma resposta hidrológica mais rápida e uma vazão de pico mais alta do que o movimento de aclave.

Ran et al. (2012) analisaram os impactos das características da chuva na geração do escoamento superficial e na erosão do solo. Em laboratório foram simuladas diferentes intensidades, durações, direções de deslocamento (montante e jusante) e posições da chuva. A partir dos dados obtidos foram elaborados hidrogramas, gráfico de sedimento (sedimentogramas), conteúdo de água no solo, e profundidade de infiltração. Dentre as conclusões, tem-se que os hidrogramas obtidos para chuvas a jusante, possuíram “mais demorados” aumentos e maiores picos de escoamento que quando comparados aos obtidos para chuvas a montante. Quanto à impermeabilização da superfície, esta alterou o padrão de infiltração, sendo que quando a chuva ocorria a montante o escoamento era maior, e quando a jusante os picos de escoamento foram menores, diferente do esperado.

Isidoro et al. (2013) estudaram a influência de conectividade na cobertura (telhados) sobre o processo chuva-vazão em áreas urbanas e impermeáveis . Um simulador de precipitação e um modelo físico foram usados para este estudo (Figura 2.8). O simulador tinha a capacidade de simular tempestades estáticas e em movimento, com ou sem vento, enquanto o modelo físico permitiu a representação de diferentes conectividades de telhados, sendo possível assim, a realização de trinta

cenários distintos. Estas experiências mostram que a conectividade na cobertura, o movimento da tempestade e a chuva com vento tem um efeito importante no escoamento urbano, levando à mudança nas formas dos hidrogramas. O aumento da conectividade na cobertura, leva a uma redução na vazão de pico e um aumento do tempo de base de escoamento. Em relação a minimização de inundações, as mais baixas descargas de pico e os mais longos tempos de base no escoamento foram obtidos para o arranjo agrupado no último piso. Os efeitos da chuva com vento são mais evidentes na vazão de pico e no ramo ascendente do hidrograma para tempestades estáticas ou a jusante. O trabalho mostrou evidências de que a conectividade na cobertura tem um efeito importante sobre o processo chuva-vazão em áreas urbanas que são impermeáveis e é influenciado pelo movimento da tempestade e pelo efeito combinado do vento e da chuva.

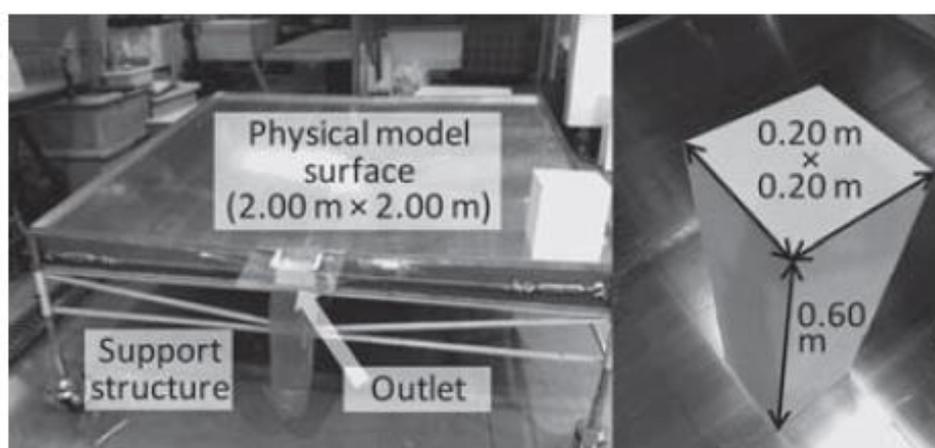


Figura 2.8 - Modelo físico.

Esquerda: Superfície do modelo feita com folha de aço;

Direita: elemento de construção feita de poliestireno expandido.

Fonte: Isidoro, et al. (2013, p.2).

Iserloh et al. (2013) estudaram a precipitação artificial gerada por 13 simuladores de chuva, baseado em várias instituições de investigação europeias e a concepção de um simulador de chuvas portátil, com a finalidade de estudar a erosão sofrida pelo solo causada pela chuva. Equipamentos foram utilizados para definir as características da chuva simulada, como um *Laser Precipitation Monitor* (LPM), que analisa a distribuição e tamanho das gotas, assim como sua velocidade de queda; pequenos coletores de chuva foram utilizados em larga quantidade para medir a

distribuição espacial da chuva. Também foram propostas equações que demonstram o comportamento da chuva no que compete a energia cinética a ser aplicada sobre o solo durante a precipitação. A comparação dos diferentes diâmetros de gotas encontrados em outras literaturas, promovem uma discussão acerca da padronização dos simuladores de chuva, de forma que se fossem utilizadas metodologias parecidas, haveria uma maior quantidade de dados a serem disponibilizados para a reprodução destes métodos. No final do estudo verificou-se que todos os dispositivos investigados são adequados para realizar simulações no campo, se todas as condições e os parâmetros são conhecidos e com precisão controlada.

Wilson et al. (2014) apresentaram a concepção, construção e testes em um simulador de chuvas, compreendido por uma malha de 4 linhas de bocais, com 4,2 m de comprimento, operados independentes, que possibilitava até 46 bocais instalados. Com essa configuração, uma área de 15 m<sup>2</sup> pode ser ensaiada e parâmetros como a umidade do solo e o escoamento do fluxo foram obtidas, possibilitando o cálculo de propriedades do solo como a condutividade hidráulica saturada,  $k_s$ . Os resultados mostraram que este simulador de chuvas pode produzir dados que permitem a estimativa de valores razoáveis para a condutividade hidráulica saturada do solo, mas sendo sensível em alguns pontos como: a intensidade da chuva que não foi uniforme quanto tipicamente desejado para chuvas simuladas, devido à baixa pressão operacional, o sistema precisa de estar perto de nível para proporcionar a distribuição de água adequada, por isso não pode ser usado em encostas íngremes e finalmente, uma vez que a água é pulverizada para cima, o sistema não funciona corretamente em condições de vento, sendo necessária uma proteção de até 3 m de altura.

Carvalho et al. (2014) analisaram a utilização combinada de malhas e bocais para alcançar chuvas com características mais homogêneas, utilizando-se de simuladores. Foi preparado uma configuração no laboratório em que se utilizava diferentes bocais e diferentes malhas, com diferentes alturas, e dois principais pontos foram analisados: a intensidade da chuva produzida com as diferentes malhas e as propriedades da gota de chuva. Para a intensidade da chuva, a utilização das malhas aumentou esta intensidade, fazendo com que houvesse uma distribuição mais regular das gotas de chuva. Estes efeitos sofreram alterações de acordo com a mudança de altura da malha utilizada abaixo do bico pulverizador. Não houve diferenciação no que compete ao material constituinte da malha, sendo que foram utilizadas malhas de

plástico e de aço. Com relação às características da gota de chuva, foi observado alterações nos diâmetros das gotas e na sua velocidade de queda, de acordo com a abertura da malha utilizada. Como as gotas produzidas pelos bocais eram, em geral, pequenas, a utilização das malhas possibilitou o acúmulo destas gotas, formando gotas maiores, e promovendo uma distribuição espacial mais aleatória destas. Com relação a velocidade de queda das gotas, não houve muita diferença observada. Observou-se também que menores pressões nos bocais produzem maiores gotas com menores velocidades de queda, enquanto maiores pressões produzem o inverso, gotas menores e velocidade de queda maior.

Isidoro e De Lima (2014) utilizaram experimentos de laboratório para estudar a importância do movimento da tempestade e vento no escoamento superficial, para diferentes alturas de construção. O foco foi dado na análise das características dos hidrogramas. Os experimentos de laboratório mostraram que, para todas as alturas de edifícios estudados, tanto o movimento do vento e da tempestade influenciam de forma significativa as características dos hidrogramas resultantes. Estes mostraram dependência significativa sobre o movimento da tempestade e da existência de vento, mas menos na altura dos edifícios. Tempestades em movimento a jusante têm maiores picos de descarga do que tempestades estáticas ou em movimento a montante e são, portanto, mais propensas para causar inundações. No que se refere ao vento: cenários simulados de chuva com vento levam a um menor pico de descarga do que sem vento, para todos tipos de tempestade.

Marzen et al. (2015) utilizaram o simulador de chuvas e de vento portátil para quantificar a erosão causada pelo pingo de chuva em cenários com e sem vento. Um pingo de chuva quando atinge a superfície, transfere parte de sua energia cinética para a superfície, destruindo dessa maneira os agregados, movendo as partículas de solo. O vento altera todas as características relevantes para a erosão de uma gota de chuva, como a velocidade, ângulo de impacto e energia cinética. Ele também pode capturar e arrastar uma partícula do solo transportado por via aérea. Duas configurações de teste foram aplicadas: Do 1º ao 6º, foram simulações de chuva, sendo um teste em substrato seco e o restante em substrato úmido e do 7º ao 11º, testes de chuvas com ventos em substrato úmido. A duração do teste foi de 5 min com drenagens nas laterais para impedir águas superficiais. Após cada teste o substrato fonte era preenchido com substrato fresco, mantendo a configuração. O material

erodido era seco em estufa (105°C/24 horas) e pesado. Os resultados mostraram que o vento aumenta consideravelmente a gota de chuva e a erosão, considerando a coesão de um substrato arenoso.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, todos os ensaios foram realizados em um modelo físico com chuva simulada por bocais pressurizados. Os ensaios consistiram em simular chuva com um tipo de bocal sobre uma superfície impermeável, combinando as seguintes variáveis: diferentes declividades longitudinais e transversais, densidade e alturas de edificações. Essas combinações foram repetidas duas vezes para minimizar os efeitos dos erros de medição e evitar a perda de dados.

Três etapas foram realizadas, quais sejam, a implantação e calibração do simulador físico e de chuva, bem como o dimensionamento do reservatório de recolhimento da água escoada; A organização dos cenários de adensamento e verticalização dos edifícios e as combinações de declividades e por fim, a análise dos dados. A primeira etapa consistiu na caracterização do bocal, determinando a intensidade de precipitação e o alcance do jato de água e a calibração do simulador, onde ensaios foram realizados a fim de se determinar o Coeficiente de Uniformidade por Christiansen (CUC) (Christiansen, 1941) e a intensidade média de precipitação ( $i$ ). A segunda etapa, constitui nos ensaios com edificações e declividades, onde a ordem dos cenários ensaiados foi escolhida pela facilidade operacional e os hidrogramas foram traçados de maneira a analisar a influência das declividades longitudinais e transversais, a altura e densidade das edificações, nos tempos de pico e tempos de base, além das vazões de pico, volumes e a forma de cada hidrograma. E a terceira etapa foi a definição dos tempos a serem analisados nos resultados.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MODELO FÍSICO E SIMULADOR DE CHUVA

Um modelo físico em escala geométrica de 1:100 foi construído para representar uma área urbana de 200 x 400 m<sup>2</sup>. O modelo reduzido tem uma forma em “V”, conforme Figura 3.1, em que o escoamento ocorre unicamente pelas vertentes e canal principal (escoamento superficial).

O material escolhido para a elaboração da base do modelo foi o polímero polimetil-metacrilato PMMA (acrílico) com espessura de 6 mm. Um material termoplástico rígido, transparente, sem cor e principalmente impermeável ou com taxas de absorção quase nulas, sendo essa última propriedade de extrema importância, pois garantiu a inexistência de perdas no volume de água precipitado (conservação da massa).

O modelo foi construído para permitir a variação das declividades longitudinais e transversais. As declividades escolhidas foram: transversal de 2,5% e 5,0% e longitudinal 2,5%, 5,0% e 10,0%, conforme os trabalhos de Isidoro (2012) e de Lima (2003).

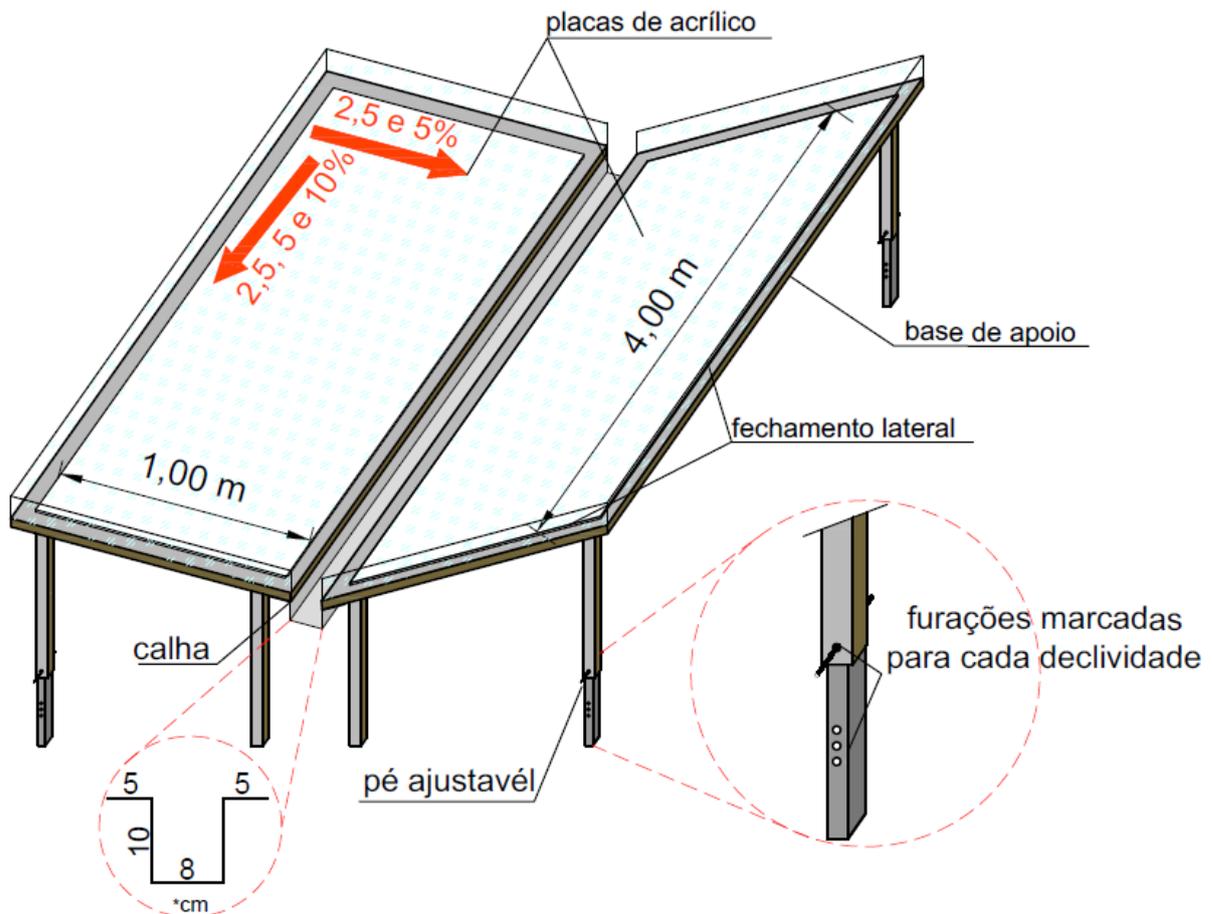


Figura 3.1 - Esquema do modelo físico, com declividades longitudinais e transversais.

Fonte: Da autora.

Diferentes arranjos dos edifícios foram analisados para verificar a influência da densidade das construções no que se refere o escoamento superficial em bacias urbanas. Entende-se aqui como densidade, a percentagem da superfície ocupada pelos blocos que simulam os edifícios.

Para essa análise, dividiu-se os ensaios em três etapas: densidades nulas (0% de ocupação), pequenas (15% de ocupação) e médias (30% de ocupação). A densidade foi determinada em relação a área de projeção horizontal. A densidade foi determinada em relação a cada superfície vertente conforme a Figura 3.2.

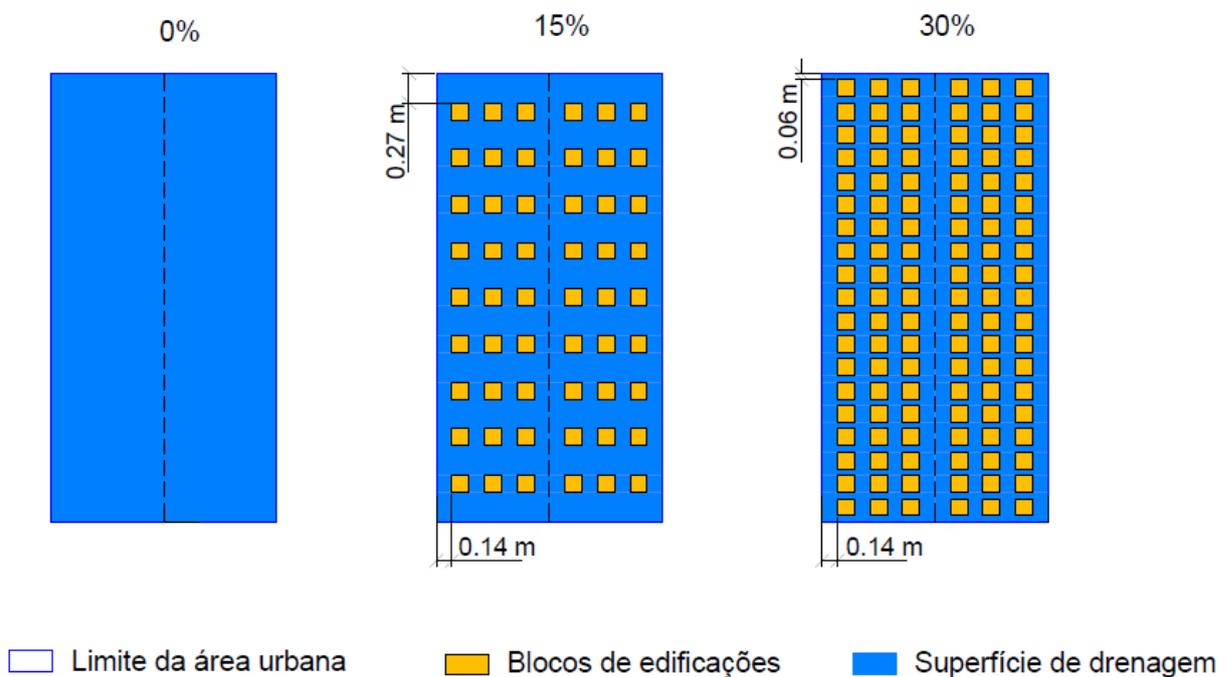


Figura 3.2 - Esquema de densidade (percentagem de ocupação de edifícios em relação a área total de superfície) e disposição das edificações.

Fonte: Da autora.

Além das diferentes densidades de edificação, realizou-se uma análise da influência da altura das edificações. Mantendo-se a escala geométrica de 1:100, os edifícios de 15 e 30 m de altura (correspondendo aproximadamente a edifícios de 5 e de 10 andares) foram construídos, respectivamente, com 15 e 30 cm (Figura 3.3). O material escolhido para a confecção dos edifícios foi o poliestireno expandido (Isopor®), material escolhido pela boa trabalhabilidade e baixa absorção de água.

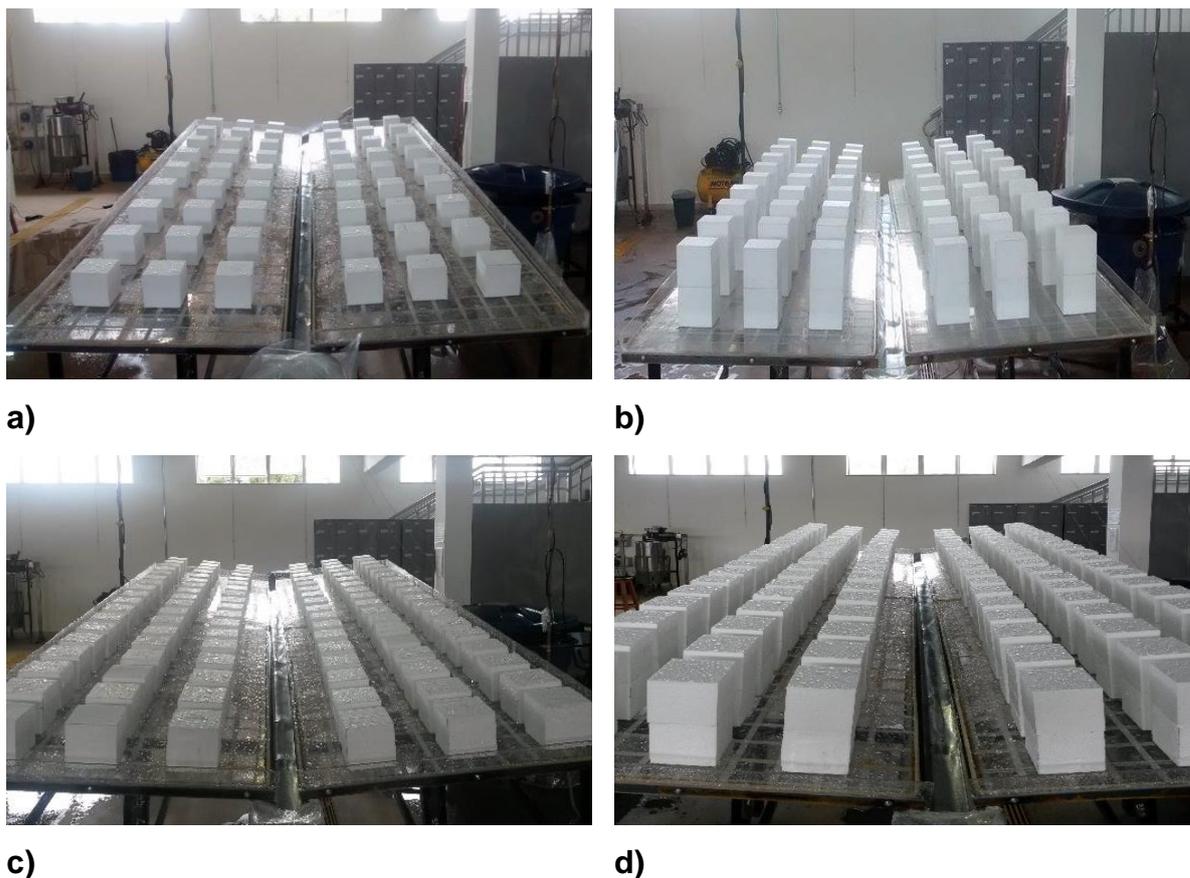


Figura 3.3 - Configurações das edificações.

- a) Edifícios com 15 cm de altura e 15% de ocupação.
- b) Edifícios com 30 cm de altura e 15% de ocupação.
- c) Edifícios com 15 cm de altura e 30% de ocupação.
- d) Edifícios com 30 cm de altura e 30% de ocupação.

Fonte: Da autora.

O simulador de chuvas, projetado e construído para este projeto, foi um simulador do tipo pressurizado. Utilizou como componentes um reservatório de PVC com capacidade de 310 L, um conjunto motor-bomba (motor com potência de 1,00 cv), um registro de gaveta e um filtro. O diâmetro da tubulação de sucção foi de 25 mm e o de recalque foi de 12,5 mm, ambos de cloreto de polivinil (PVC). A saída do sistema pressurizado termina em três bocais, orientados para baixo, do tipo cone completo (*FullJet*<sup>®</sup>) controlado com uma válvula solenóide e manômetro digital. A distância entre os bocais e a superfície do modelo reduzido foi de 2,50 m.

O esquema do simulador de chuvas e do modelo físico são apresentados na Figura 3.4.

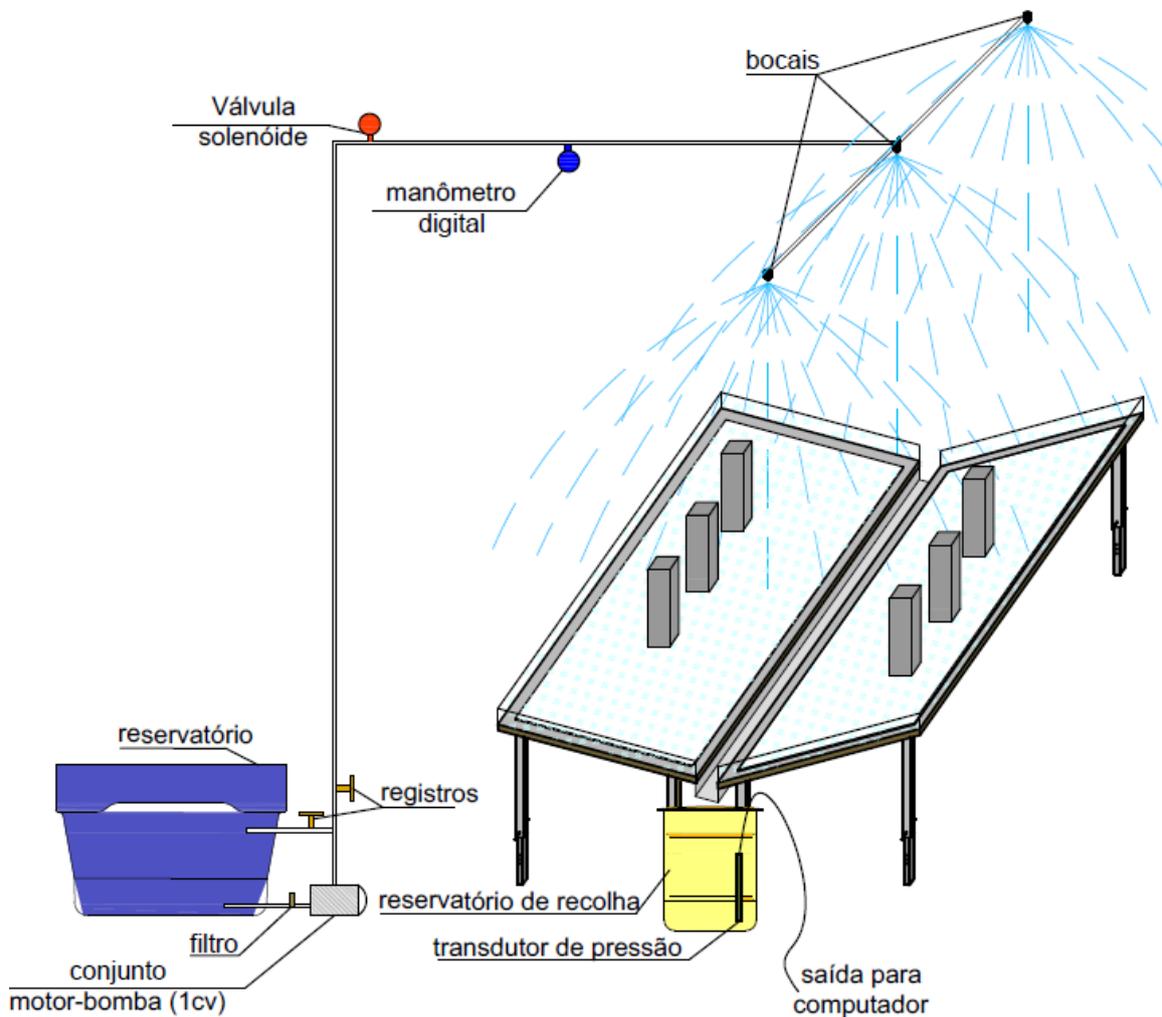


Figura 3.4 - Esquema do simulador de chuvas e reservatório de recolhimento da água.

Fonte: Da autora.

Para obter os hidrogramas de escoamento superficial para cada evento de chuva foi utilizado a medição volumétrica da água escoada na saída do modelo reduzido, por intervalo de tempo. Um reservatório cilíndrico com seção transversal conhecida foi colocado na saída do modelo reduzido, medindo-se a altura da água para determinação do volume em intervalos de tempo definidos. Essa variação do nível da água no reservatório foi obtida através de um linígrafo acoplado a um *datalogger* com captação de dados com um intervalo de tempo 1 segundo entre cada leitura.

O bocal selecionado foi do tipo *FullJet*<sup>®</sup>, HH- W ¼ (Figura 3.5), mesma classe de bocais utilizados por Isidoro (2012). Na Tabela 3.1 são apresentadas as características do bocal, segundo o fabricante.



Figura 3.5 - Bocal FullJet<sup>®</sup> HH-W ¼, Spraying Systems Co<sup>®</sup>

Fonte: Da autora.

Tabela 3.1 - Característica do bocal FullJet<sup>®</sup> HH-W ¼ (pressão em bar).

Conexão de Entrada (pol.)	Tipo do Bico						Capacidade	Diâmetro do Orifício (mm)	Diâmetro Máximo de Passagem Livre (mm)	Vazão (litros por minuto)*										Ângulo de Pulverização (**)*		
	Tipo padrão				Ângulo					0.4	0.5	0.7	1	1.5	2	3	4	6	0.4	0.7	6	
	G-W	GG-W	HH-W	H-W	GA-W	GGA-W																
1/4	●	●					10W	2.8	1.3	2.9	3.3	3.8	4.5	5.4	6.2	7.4	8.5	10.2	11.2	12.0	103	
	●	●					12W	3.2	1.3	3.5	3.9	4.6	5.4	6.5	7.4	8.9	10.2	12.3	11.4	12.0	103	
	●	●	●		●	●	14W	3.6	1.6	4.1	4.6	5.3	6.3	7.6	8.6	10.4	11.9	14.3	11.4	12.0	103	

Fonte: Catálogo Spraying Systems Co<sup>®</sup>, p. B19.

### 3.1.1 Calibração do simulador de chuva

Após a caracterização do bocal, verificou-se qual a melhor disposição e a quantidade necessária de bocais. Os experimentos realizados permitiram concluir que a melhor configuração foi com três bocais instalados, sendo um no centro, e dois nas extremidades, distanciados em 1 m, no sentido longitudinal do modelo reduzido. Essa

configuração foi validada através de ensaios e de forma teórica através de sobreposições de efeitos.

Para a calibração do simulador de chuva, dois parâmetros foram levados em consideração: a intensidade média de precipitação,  $\bar{i}$ , e o CUC. Para a obtenção de  $\bar{i}$  e do CUC, recipientes plásticos de massa conhecida, foram distribuídos em toda a área do modelo físico reduzido, espaçados em 20 cm, totalizando 200 recipientes, tendo assim uma boa resolução da distribuição espacial (Figura 3.6).

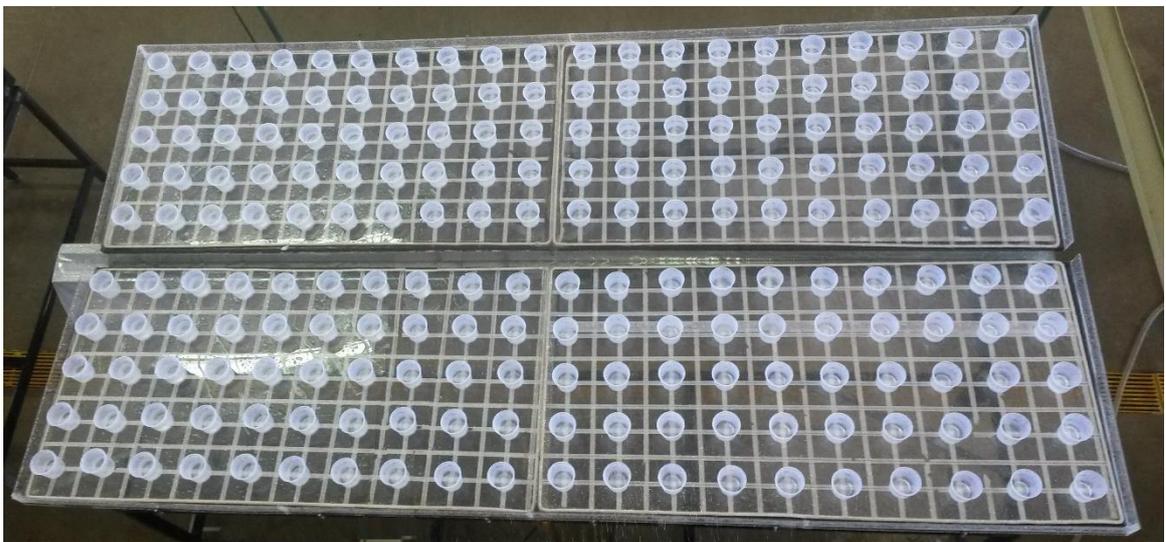


Figura 3.6 - Disposição dos recipientes para verificação da distribuição espacial.

Fonte: Da autora

A uniformidade da distribuição foi avaliada por meio do coeficiente de uniformidade proposto por Christiansen, que adotou o desvio médio como medida de dispersão, calculado pela Equação 3.1.

$$CUC = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Em que,  $n$  é o número de observações (200);  $x_i$  é a altura precipitada no local  $i$ ;  $\bar{x}$  é a altura média precipitada; CUC em porcentagem.

A determinação da intensidade de precipitação média espacial,  $i$  ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ), foi calculada através do somatório que considera a intensidade de precipitação de cada recipiente amostrado, conforme a Equação 3.2.

$$i = \sum_{i=1}^n \left( \frac{Vp_i}{A \cdot t} \right) \quad (3.2)$$

Em que,  $Vp_i$  ( $\text{mm}^3$ ), é o volume precipitado da amostra  $i$ , calculado pela diferença de massa entre os recipientes antes e depois do ensaio;  $A$  ( $\text{mm}^2$ ), área da abertura dos recipientes e  $t$  (h), o tempo de precipitação, que foi utilizado 30 min (0,5 horas) considerando o volume dos recipientes para garantir uma boa precisão e evitar o transbordamento.

A pressão foi monitorada ao longo de todo o ensaio, pois o mesmo bocal, sujeito à mesma pressão, levará à mesma vazão, garantindo assim uma intensidade de precipitação média constante.

### 3.1.2 Dimensionamento do reservatório de recolhimento

Nessa etapa realizou-se o dimensionamento do reservatório de recolhimento da água do simulador. Esse ensaio consistiu em verificar qual o volume escoado da superfície do modelo para uma precipitação de duração de 2 min, mesma duração utilizada para todos ensaios.

Um padrão para o início do ensaio foi utilizado. Antes de qualquer medição, a bomba era acionada por 2 min e então desligada, esperava-se 5 min e então começava-se a rotina de ensaios. Assim garantiu-se que as placas ficassem molhadas de uma forma mais uniforme e mais semelhante possível a cada início de ensaio.

Adotou-se como padrão para o final do escoamento superficial, o momento em que a saída da água do modelo passava de fluxo contínuo para gotas.

Foi acoplado ao reservatório um transdutor de pressão modelo *Solinst*® 3001 F6M2, com precisão de  $\pm 0,1$  cm que forneceu os valores de nível de água, para a

obtenção dos hidrogramas. Para evitar a flutuação da vazão (efeito da turbulência), o transdutor de pressão ficou dentro de um tubo com diâmetro reduzido e perfurado.

### 3.2 DELINEAMENTO

A rotina dos ensaios de laboratório foi composta por simulações de diferentes cenários de edificações e declividades. A Tabela 3.2 apresenta a combinação de variáveis que definiram os cenários ensaiados. No total, entre as variações de declividades longitudinais, declividades transversais, densidade e altura das edificações foram 30 combinações, realizadas em duplicata para evitar possíveis perdas de dados, totalizando 60 ensaios. A ocupação nula ou de 0% foi considerada para fins comparativos, não sendo esse um cenário de urbanização.

Tabela 3.2 - Matriz de cenários ensaiados.

CENÁRIOS		ENSAIOS																													
		1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º	12º	13º	14º	15º	16º	17º	18º	19º	20º	21º	22º	23º	24º	25º	26º	27º	28º	29º	30º
Densidade de edificações	0%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	15%	.	.	.	.	.	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	30%	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Altura dos edifícios	15 cm	.	.	.	.	.	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	.	.	.	.	.	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	.	.	.	.	
	30 cm	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	.	.	.	.	.	.	✓	✓	✓	✓	✓
Declividades	Transversal	2,5%	✓	✓	✓	.	.	.	✓	✓	✓	.	.	.	✓	✓	✓	.	.	.	✓	✓	✓	.	.	.	✓	✓	✓	.	.
		5,0%	.	.	.	✓	✓	✓	.	.	.	✓	✓	✓	.	.	.	✓	✓	✓	.	.	.	✓	✓	✓	.	.	.	✓	✓
	Longitudinal	2,5%	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.
		5,0%	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓
		10,0%	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	.	✓	.	✓

Fonte: Da autora.

A mesma metodologia de início e parada do ensaio utilizada no dimensionamento do reservatório de recolhimento foi adotada nessa etapa, começando sempre com as placas molhadas, esperando 5 minutos entre cada ensaio e considerando final de escoamento a interrupção do fluxo contínuo.

A duração da precipitação foi de 2 min, utilizando como referência o trabalho realizado por Isidoro (2012).

### 3.3 ANÁLISE DOS DADOS (HIDROGRAMAS)

Os critérios a seguir servem de base para a análise dos resultados dos hidrogramas que serão apresentados nos itens, 4.2: “Influência na declividade no hidrograma”, 4.3: “Influência da densidade das edificações no hidrograma” e 4.4: “Influência da altura das edificações no hidrograma”.

Para a análise dos dados dos hidrogramas, valores específicos da abscissa (tempo) foram obtidos. Esses valores são:  $t_1$ , definido como começo da ascensão;  $t_2$ , definido como o começo do patamar;  $t_3$ , definido como o final do patamar-começo da recessão;  $t_4$ , definido como o final da recessão,  $t_5$  definido como o final do escoamento (tempo de base) e o tempo de concentração  $t_c$ , definido como a diferença entre o final da precipitação e o final do escoamento (Figura 3.8).

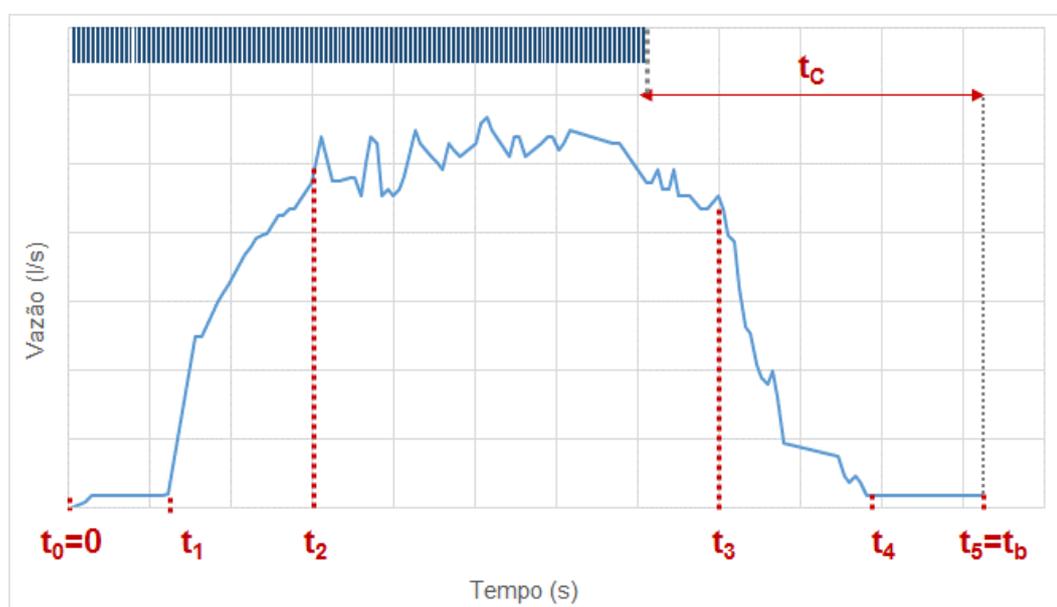


Figura 3.7 - Esquema dos tempos analisados.

Fonte: Da autora.

Todos os hidrogramas atingiram o tempo de concentração ( $t_c$ ) e conseqüentemente a vazão de pico, que será considerada a vazão de patamar ( $Q_{\text{patamar}}$ ), ou seja, a média das vazões compreendidas entre os tempos  $t_2$  e  $t_3$ .

Os hidrogramas são representados por uma tendência ajustada para uma média móvel para 4 valores próximos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados obtidos em todas as etapas experimentais. Esse item está dividido em duas partes: simulador de precipitação e ensaios de precipitação-escoamento. A primeira parte apresenta os resultados obtidos do simulador de precipitação como os resultados provenientes da caracterização do bocal, resultados dos ensaios de calibração e do volume escoado no modelo reduzido após a precipitação. A segunda parte, apresenta os resultados dos cenários ensaiados, ou seja, a influência, ou não, das diferentes declividades longitudinais e transversais, das densidades de ocupação e alturas das edificações, nos valores de tempo e vazão e no formato dos hidrogramas.

### 4.1 SIMULADOR DE PRECIPITAÇÃO

#### 4.1.1 Caracterização do bocal

A Figura 4.1 apresenta a curva característica do bocal utilizado nos ensaios (*FullJet*® HH-W  $\frac{1}{4}$ ), segundo os dados fornecidos pelo fabricante e a equação potencial que relaciona a vazão a pressão do bocal.

Essa caracterização possibilitou a determinação da vazão do simulador de precipitação, cerca de 6,78 L/min para cada bocal ou 20,34 L para todo o simulador, um valor dentro do esperado.

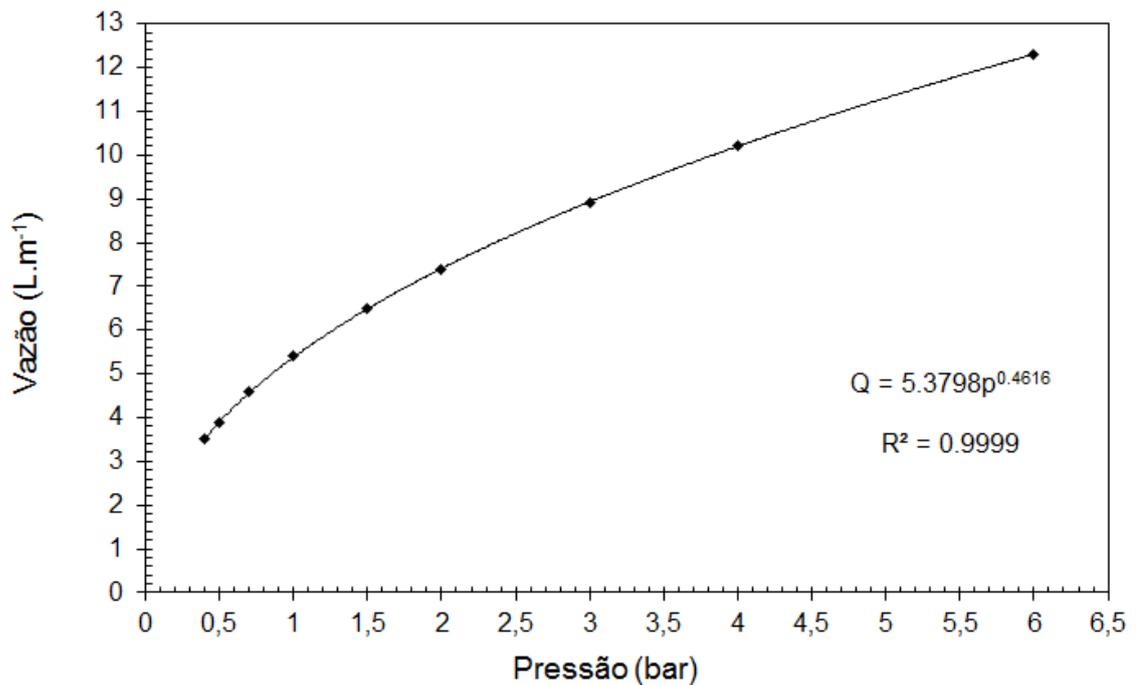


Figura 4.1 - Curva característica do bocal FullJet® HH-W ¼.

Fonte: Da autora.

#### 4.1.2 Uniformidade e intensidade média de precipitação do simulador

A Figura 4.2 apresenta a intensidade de precipitação na área experimental. Com os três bocais em funcionamento, obteve-se uma pressão na tubulação de 1,65 bar que resultou numa intensidade de precipitação média ( $i$ ) de 78,82 mm·h<sup>-1</sup> e um coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) de 78,63%.

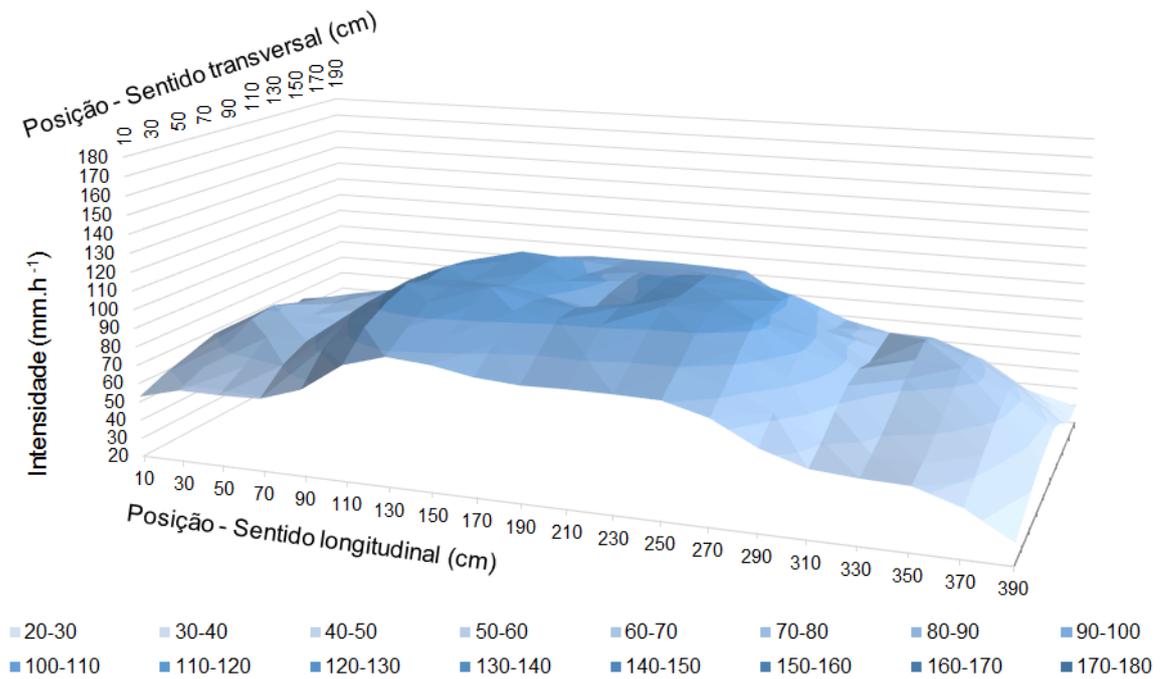


Figura 4.2 - Distribuição espacial da intensidade de precipitação média (mm·h<sup>-1</sup>).

Fonte: Da autora.

Os resultados obtidos nessa etapa mostraram que o simulador de chuva projetado foi capaz de fornecer uma intensidade média de precipitação e um CUC adequados e similares a valores já obtidos por outros como Aksoy (2012) e Isidoro (2012).

#### 4.1.3 Verificação da conservação de massa

O volume escoado em 2 min de precipitação, para duas combinações de declividades (transversal x longitudinal): 2,5% x 2,5% e 5,0% x 10,0% foi de 21 L.

Sabendo-se que a altura precipitada é o volume escoado, V, dividido pela área, A, pode-se fazer uma relação com a intensidade de precipitação conforme a Equação 4.1.

$$i = \frac{(V/A)}{t} \tag{4.1}$$

Admitindo uma intensidade de precipitação constante de  $78,82 \text{ mm.h}^{-1}$ , em um tempo de teste de 0,03 horas (2 minutos), em teoria se formaria uma lâmina uniforme de 2,63 mm, produzindo um volume de deflúvio superficial teórico de 21,02 L ( $2,10 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$ ), que quando comparado ao valor medido observa-se similaridade dos valores.

Nessa etapa os resultados foram satisfatórios, podendo, através de correlações de área e intensidade média de precipitação, chegar em valores teóricos muito próximos aos valores encontrados através de ensaios, comprovando a conservação de massa do modelo e simulador, não ocorrendo perdas e nem retenções significativas de volume. Com estas correlações foi possível escolher quais os bocais e as pressões de serviço a utilizar quando se pretende obter uma determinada intensidade de precipitação média sobre a área de estudo.

## 4.2 INFLUÊNCIA DA DECLIVIDADE NO HIDROGRAMA

### 4.2.1 Influência da declividade longitudinal

Mantida fixa a declividade transversal do modelo reduzido, avaliou-se a influência da variação da declividade longitudinal na resposta dos hidrogramas produzidos. Pelas Figuras 4.3 e 4.4 é possível observar o hidrograma para a declividade transversal de 2,5% e 5,0%, respectivamente.

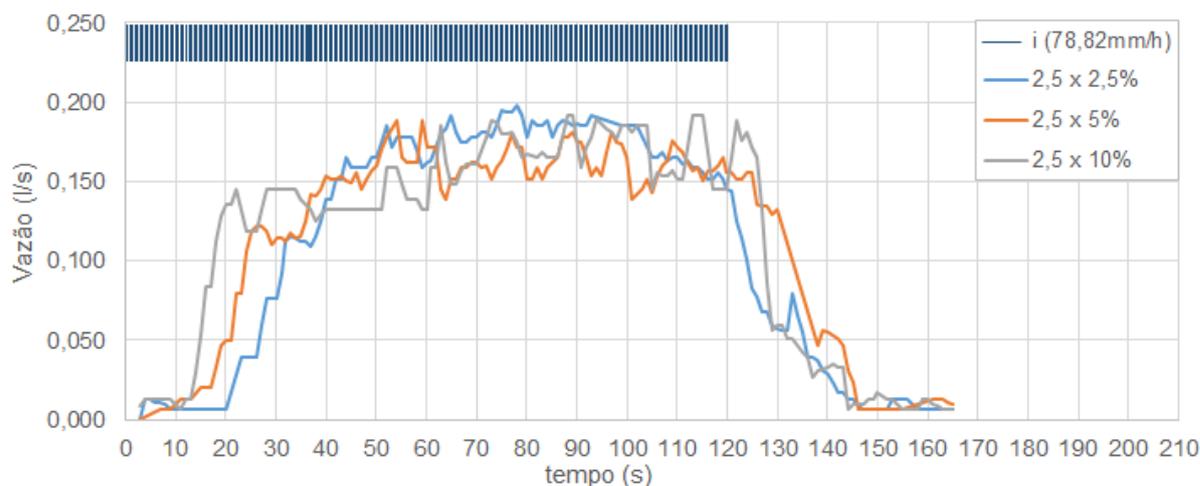


Figura 4.3 - Hidrograma produzido para um cenário sem edificações, com 2,5% de declividade transversal, variando a declividade longitudinal em 2,5%, 5,0%, e 10,0%.

Fonte: Da autora.

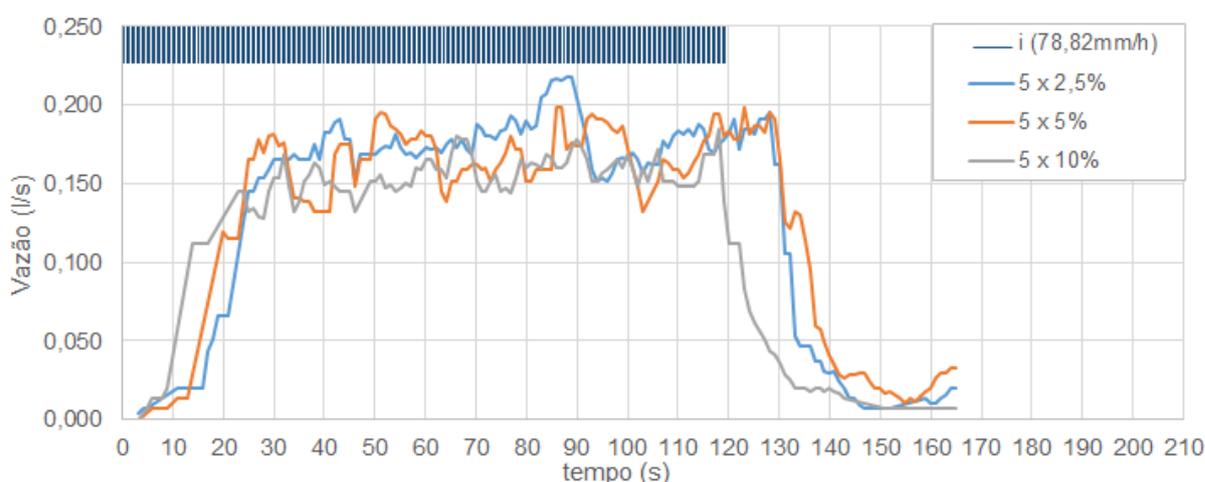


Figura 4.4 - Hidrograma produzido para um cenário sem edificações, com 5,0% de declividade transversal, variando a declividade longitudinal em 2,5%, 5,0%, e 10,0%.

Fonte: Da autora.

Observou-se, dos tempos extraídos dos hidrogramas (Figuras 4.3 e 4.4), uma diferença no tempo  $t_2$ , como pode ser observado na Tabela 4.1, que com o aumento da declividade longitudinal, verifica-se uma diminuição do tempo para atingir a vazão de pico.

Tabela 4.1 - Valores dos tempos para um cenário sem edificações, com 2,5% e 5,0% de declividade transversal, variando a declividade longitudinal em 2,5%, 5,0%, e 10,0%.

Tempos (s)	Declividades transversais					
	2,5%			5,0%		
	Declividades longitudinais					
	2,5%	5,0%	10,0%	2,5%	5,0%	10,0%
$t_0$	0	0	0	0	0	0
$t_1$	17	10	10	11	10	6
$t_2$	40	37	19	26	24	23
$t_3$	119	125	125	125	133	119
$t_4$	141	144	144	144	155	140
$t_5=t_b$	165	161	165	172	178	168
$t_c$	45	41	45	52	58	48

Fonte: Da autora.

Observou-se que com o acréscimo da declividade longitudinal, ocorreu uma diminuição do tempo  $t_2$ . Essa diminuição, foi mais evidente quando a configuração continha a menor declividade transversal 2,5%, com redução de 52,50% de  $t_2$ , enquanto com a declividade transversal de 5,0%, a redução foi de 11,54%.

Isto evidencia que o aumento da declividade longitudinal produz uma diminuição do tempo  $t_2$ , sensivelmente maior para a menor declividade transversal estudada, para superfícies impermeáveis sem edificações.

#### 4.2.2 Influência da declividade transversal

Mantendo-se fixa a declividade longitudinal do modelo reduzido, avaliou-se a influência da variação da declividade transversal na resposta dos hidrogramas produzidos. Pelas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 é possível observar o hidrograma para as declividades longitudinais de 2,5%, 5,0% e 10,0%, respectivamente.

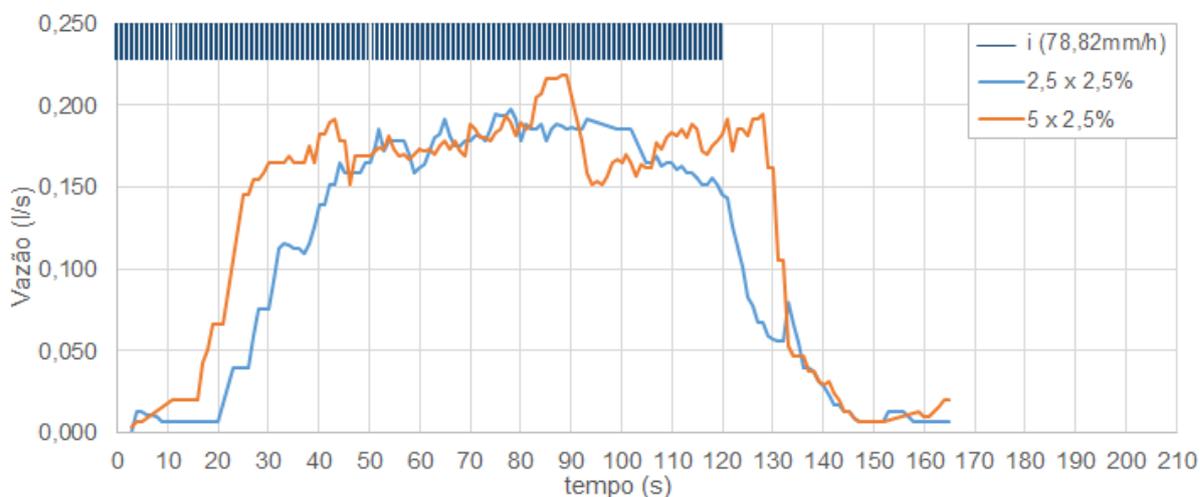


Figura 4.5 - Hidrograma produzido para um cenário sem edificações, com 2,5% de declividade longitudinal, variando a declividade transversal em 2,5% e 5,0%.

Fonte: Da autora.

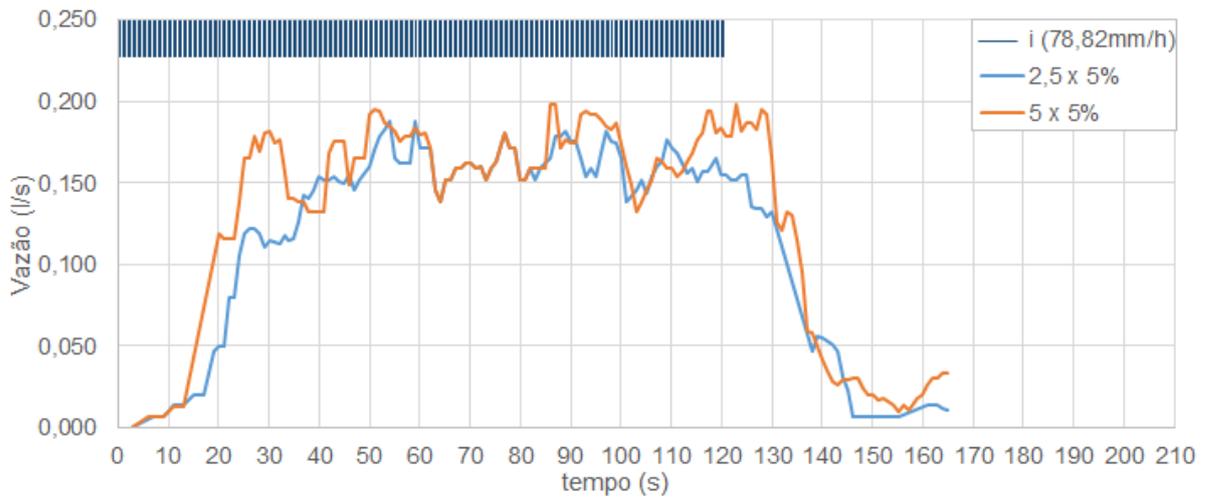


Figura 4.6 - Hidrograma produzido para um cenário sem edificações, com 5,0% de declividade longitudinal, variando a declividade transversal em 2,5% e 5,0%.

Fonte: Da autora.

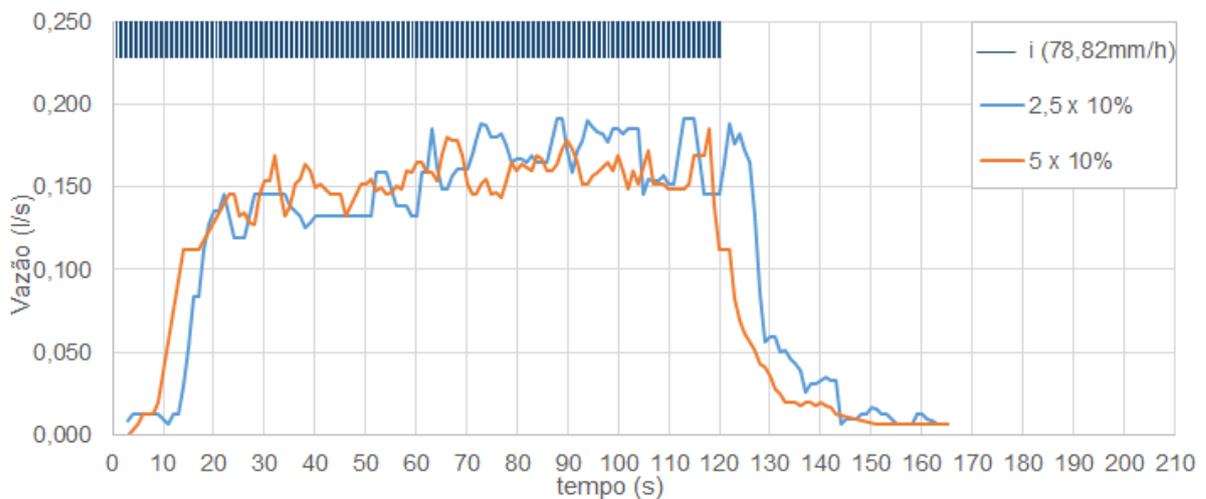


Figura 4.7 - Hidrograma produzido para um cenário sem edificações, com 10,0% de declividade longitudinal, variando a declividade transversal em 2,5% e 5,0%.

Fonte: Da autora.

Observou-se dos tempos extraídos dos hidrogramas (Figuras 4.5, 4.6 e 4.7), uma diferença no tempo  $t_2$  com o incremento da declividade transversal. A Tabela 4.2, apresenta os resultados (tempos) apresentados anteriormente, porém, descritos de maneira a ajudar na compreensão da influência da declividade transversal.

Tabela 4.2 - Valores dos tempos para um cenário sem edificação, fixando as declividades longitudinais (2,5%, 5,0% e 10,0%) e variando a declividade transversal em 2,5% e 5,0%.

Tempos (s)	Declividades longitudinais					
	2,5%		5,0%		10,0%	
	Declividades transversais					
	2,5 %	5,0 %	2,5%	5,0 %	2,5 %	5,0 %
$t_0$	0	0	0	0	0	0
$t_1$	17	11	10	10	10	6
$t_2$	40	26	37	24	19	23
$t_3$	119	125	125	133	125	119
$t_4$	141	144	144	155	144	140
$t_5=t_b$	165	172	161	178	165	168
$t_c$	45	52	41	58	45	48

Fonte: Da autora.

Observou-se que com o acréscimo da declividade transversal, ocorreu uma diminuição no tempo  $t_2$ , observada nas declividades longitudinais de 2,5% e 5,0%, com redução de 35,00% e 35,10%, respectivamente, mas não foi observada na declividade longitudinal de 10,0%, onde aparentemente o patamar demorou mais para ser atingido.

Outra análise realizada segundo Tucci (2004) é a estimativa da vazão de pico utilizando o método racional, cujo coeficiente de escoamento superficial, *runoff*, é igual a uma unidade, foi de 0,175 L·s<sup>-1</sup>. Comparou-se os valores de vazão teórica com os valores de patamar, consideradas os picos, observados para as diferentes declividades, sendo esses valores: para 2,5% fixos no sentido transversal: 0,174 L·s<sup>-1</sup> (2,5%); 0,162 L·s<sup>-1</sup> (5,0%) e 0,163 L·s<sup>-1</sup> (10,0%) e para 5,0% fixos no sentido transversal: 0,176 L·s<sup>-1</sup> (2,5%); 0,168 L·s<sup>-1</sup> (5,0%); 0,157 L·s<sup>-1</sup> (10,0%). Observou-se uma variação média 4,94%, que pode ser explicada pelo da flutuação da vazão (provável efeito da turbulência).

### 4.3 INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DAS EDIFICAÇÕES NO HIDROGRAMA

#### 4.3.1 Influência da densidade das edificações baixas (15 cm)

Para cada combinação de declividades transversal e longitudinal, avaliou-se a influência da variação da densidade de edificações em 15% e 30%, (sendo os tempos de 0% de edificações, valores já apresentados anteriormente), na resposta dos hidrogramas produzidos, para uma situação de edificações baixas (15 cm). Pela Figura 4.8 é possível observar os hidrogramas para as combinações de declividades (transversal x longitudinal): 2,5% $\times$ 2,5%, 2,5% $\times$ 5,0%, 2,5% $\times$ 10,0%, 5,0% $\times$ 2,5%, 5,0% $\times$ 5,0% e 5,0% $\times$ 10,0%.

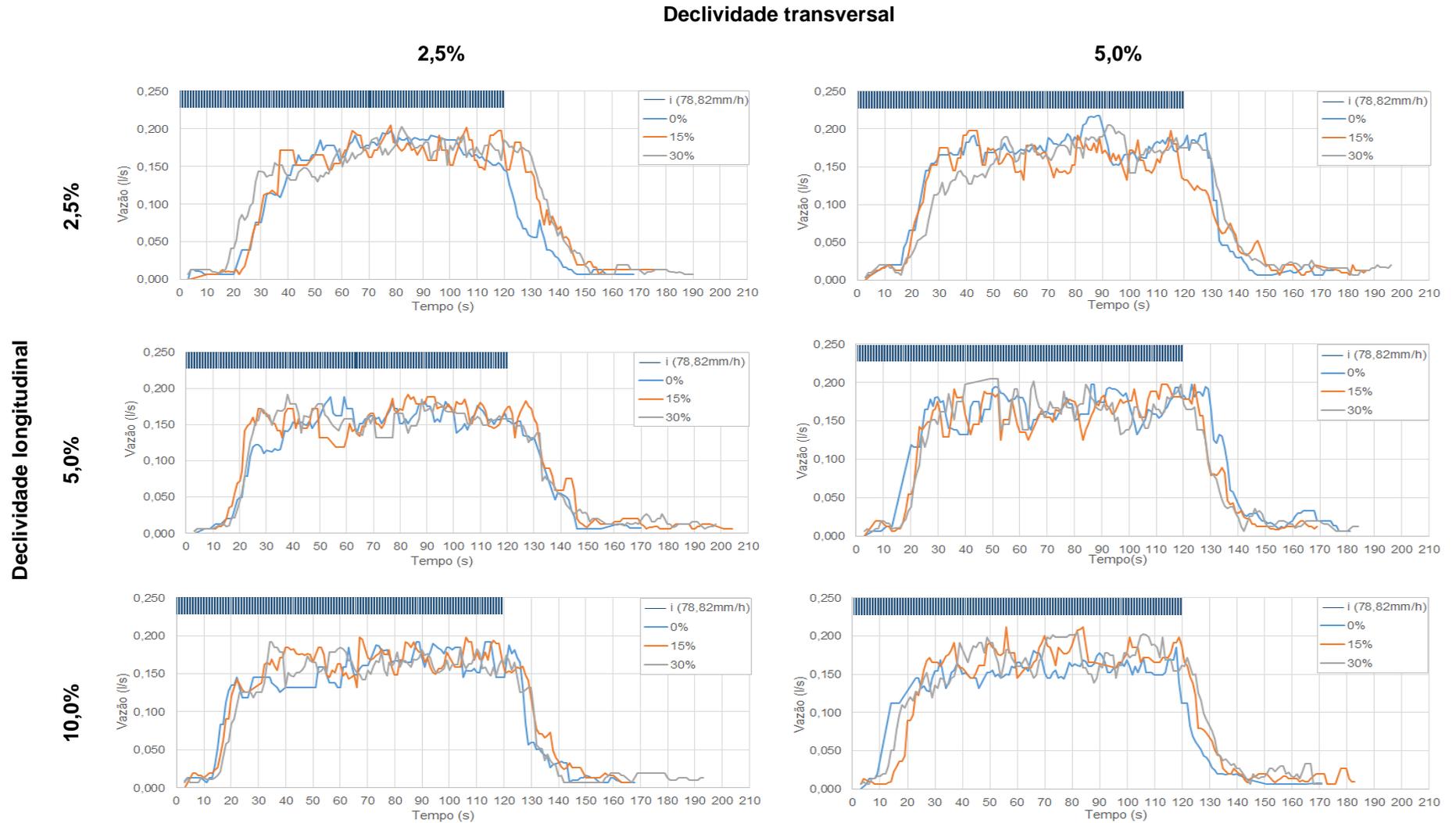


Figura 4.8 - Hidrogramas as declividades longitudinais e transversais, com edificações de 15 cm e taxas de ocupação de 0%,15% e 30%.

Fonte: Da autora.

Os tempos dos hidrogramas (Figura 4.8) foram analisados e verificou-se que o aumento da densidade de edificações, evidenciado principalmente na configuração de 30%, provocou um aumento no tempo de base ( $t_5$ ) em relação ao hidrograma sem edificações, conforme resultados apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4. Essa diferença é mais acentuada para declividade transversal 2,5%. O aumento do tempo de base se deve, provavelmente, à retenção junto as superfícies das edificações.

Tabela 4.3 - Valores dos tempos para três densidades de ocupação (0%, 15% e 30%), com edificações de 15 cm de altura e declividades de 2,5%×2,5%, 2,5 %×5,0% e 2,5%×10,0%.

Tempos (s)	Combinções de declividades ( <i>Transversal</i> × <i>Longitudinal</i> )								
	2,5%×2,5%			2,5%×5,0%			2,5%×10,0%		
	Densidades de edificações								
	0%	15%	30%	0%	15%	30%	0%	15%	30%
$t_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$t_1$	17	22	14	10	10	13	10	11	11
$t_2$	40	37	28	37	24	23	19	20	29
$t_3$	119	127	128	125	133	127	125	123	125
$t_4$	141	147	150	144	147	151	144	145	139
$t_5=t_b$	165	177	187	161	193	195	165	163	190
$t_c$	45	57	67	41	73	75	45	43	70

Fonte: Da autora.

Tabela 4.4 - Valores dos tempos para três densidades de ocupação (0%, 15% e 30%), com edificações de 15 cm de altura e declividade de 5,0%×2,5%, 5,0%×5,0% e 5,0%×10,0%.

Tempos (s)	Combinações de declividades ( <i>Transversal</i> × <i>Longitudinal</i> )								
	5,0%×2,5%			5,0%×5,0%			5,0%×10,0%		
	Densidades de edificações								
	0%	15%	30%	0%	15%	30%	0%	15%	30%
$t_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$t_1$	11	14	14	10	14	15	6	11	12
$t_2$	26	25	28	24	24	24	23	25	18
$t_3$	125	125	130	133	125	125	119	122	124
$t_4$	144	152	147	155	140	139	140	141	145
$t_5=t_b$	172	185	193	178	165	181	168	182	168
$t_c$	52	65	73	58	45	61	48	62	48

Fonte: Da autora.

A análise dos hidrogramas das densidades de edificações de 15% para 30%, com edificações baixas, não evidenciou diferenças nos tempos.

Observa-se nos resultados notadamente na combinação 2,5%×2,5%, o efeito da diminuição do tempo  $t_2$ , para as duas densidades de edificações, em relação ao tempo  $t_2$  observado no hidrograma sem edificações. Esta evidência não foi observada nas outras combinações de declividades, sugerindo que o efeito da densidade das edificações é importante somente na combinação de baixas declividades.

Verificou-se que os tempos de concentração ( $t_c$ ) aumentaram em 40% e 39% com a inserção das edificações para as densidades de 15% e 30% respectivamente.

Os valores da vazão de patamar, considerados com vazão de pico, foram comparados com a vazão teórica de 0,175 L·s<sup>-1</sup> e apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores da vazão de patamar para três densidades de ocupação (0%, 15% e 30%), com edificações de 15 cm de altura.

Combinações de declividades ( <i>Transversal x Longitudinal</i> )	Vazão de patamar ( $L \cdot s^{-1}$ )		
	0%	15%	30%
2,5% $\times$ 2,5%	0,174	0,171	0,166
2,5% $\times$ 5,0%	0,162	0,163	0,160
2,5% $\times$ 10,0%	0,163	0,167	0,163
5,0% $\times$ 2,5%	0,176	0,161	0,167
5,0% $\times$ 5,0%	0,168	0,167	0,166
5,0% $\times$ 10,0%	0,157	0,175	0,165

Fonte: Da autora

Observou-se uma variação média 5,14%, que pode ser explicada, possivelmente devido às flutuações oriundas do método de medição de vazão. Destaca-se que 89% dos valores da vazão de patamar estão abaixo da vazão teórica de  $0,175 L \cdot s^{-1}$ , o que sugere que talvez possa ter ocorrido retenção junto às superfícies das edificações.

#### 4.3.2 Influência da densidade das edificações altas (30 cm)

A mesma análise da influência da variação da densidade de edificações em 0%, 15% e 30%, na resposta dos hidrogramas, foi realizada para uma situação de edificações altas (30 cm). Pela Figura 4.9 é possível observar o hidrograma para as combinações de declividades (transversal x longitudinal): 2,5% $\times$ 2,5%, 2,5% $\times$ 5,0%, 2,5% $\times$ 10,0%, 5,0% $\times$ 2,5%, 5,0% $\times$ 5,0% e 5,0% $\times$ 10,0%.

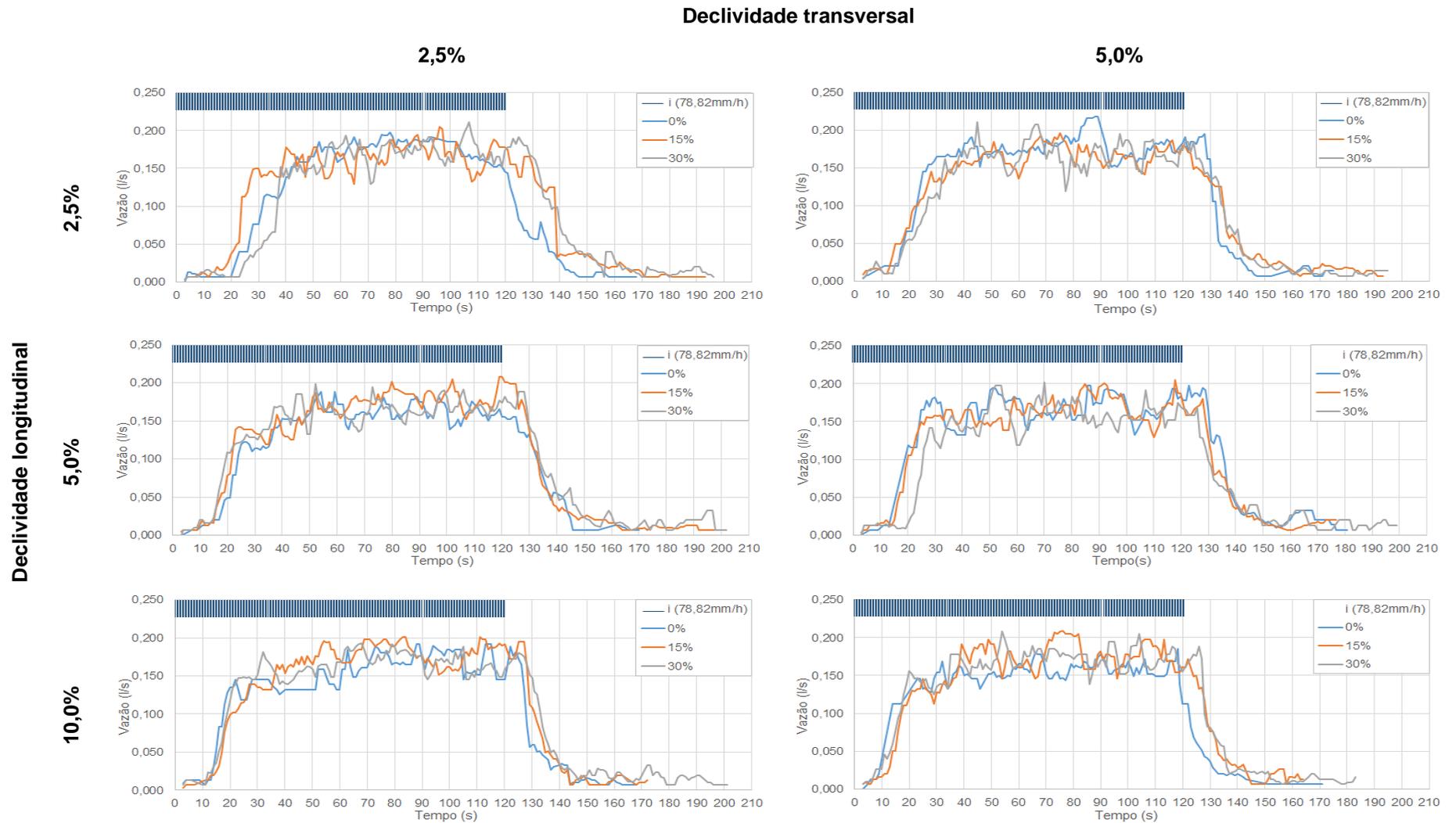


Figura 4.9 - Hidrogramas para todas declividades longitudinais e transversais, com edificações de 30 cm e taxas de 0%,15% e 30%.

Fonte: Da autora.

Os tempos dos hidrogramas (Figura 4.9) foram analisados e verificou-se que o aumento da densidade de edificações propiciou um aumento no tempo de base, conforme as Tabelas 4.6 e 4.7 (onde os valores para a densidade de edificações nulas são os mesmos apresentados anteriormente). Observa-se um aumento no tempo de base, se comparados os resultados com edificações em relação aos sem edificações, porém sem um padrão regular, que permita generalizar esse efeito. Nota-se ainda que esse efeito é maior com alturas de 30 cm.

Tabela 4.6 - Valores dos tempos para três densidades de ocupação (0%, 15% e 30%), com edificações de 30 cm de altura e declividades de 2,5% $\times$ 2,5%, 2,5% $\times$ 5,0% e 2,5% $\times$ 10,0%.

Tempos (s)	Combinações de declividades ( <i>Transversal x Longitudinal</i> )								
	2,5% $\times$ 2,5%			2,5% $\times$ 5,0%			2,5% $\times$ 10,0%		
	Densidades de edificações								
	0%	15%	30%	0%	0%	0%	0%	15%	30%
$t_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$t_1$	17	16	20	10	11	12	10	11	10
$t_2$	40	29	37	37	22	36	19	26	20
$t_3$	119	129	130	125	126	130	125	128	127
$t_4$	141	158	153	144	159	153	144	141	144
$t_5=t_b$	165	190	194	161	197	191	165	169	198
$t_c$	45	70	74	41	77	71	45	49	78

Fonte: Da autora.

Tabela 4.7 - Valores dos tempos para três densidades de ocupação (0%, 15% e 30%), com edificações de 30 cm de altura e declividade de 5,0%×2,5%, 5,0%×5,0% e 5,0%×10,0%.

Tempos (s)	Combinções de declividades ( <i>Transversal</i> × <i>Longitudinal</i> )								
	5,0%×2,5%			5,0%×5,0%			5,0%×10,0%		
	Densidades de edificações								
	0%	15%	30%	0%	15%	30%	0%	15%	30%
$t_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$t_1$	11	10	11	10	13	19	6	7	12
$t_2$	26	24	33	24	22	28	23	18	15
$t_3$	125	126	129	133	128	126	119	125	124
$t_4$	144	151	148	155	150	151	140	145	136
$t_5=t_b$	172	190	192	178	174	196	168	168	192
$t_c$	52	70	72	58	54	76	48	48	72

Fonte: Da autora.

A análise dos hidrogramas das densidades de edificações de 15% para 30%, com edificações altas, não evidenciou diferenças nos tempos, repetindo a observação feita com alturas de 15 cm.

Comparando-se os cenários de 0% e 15%, verificou-se que um aumento no tempo de concentração médio de 37,37%, não evidenciado somente na combinação de declividades 5,0%×5,0%. O aumento no tempo de concentração na comparação dos cenários de 0% e 30% foi ainda maior, em média de 55,07% verificado em todas as combinações de declividades.

Comparou-se com os valores de vazão teórica de 0,175 L·s<sup>-1</sup>, com os valores de patamar, consideradas os picos, observados para os diferentes cenários, sendo esses valores descritos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Valores da vazão de patamar para três densidades de ocupação (0%, 15% e 30%), com edificações de 30 cm de altura.

Combinções de declividades ( <i>Transversal x Longitudinal</i> )	Vazão de patamar ( $L \cdot s^{-1}$ )		
	0%	15%	30%
2,5% $\times$ 2,5%	0,174	0,162	0,169
2,5% $\times$ 5,0%	0,162	0,168	0,166
2,5% $\times$ 10,0%	0,163	0,175	0,166
5,0% $\times$ 2,5%	0,176	0,166	0,166
5,0% $\times$ 5,0%	0,168	0,165	0,158
5,0% $\times$ 10,0%	0,157	0,167	0,167

Fonte: Da autora.

Observou-se uma variação média 5,01%, explicada devido as flutuações da vazão (provável efeito de turbulência).

#### 4.4 INFLUÊNCIA DA ALTURA DO EDIFICADO NO HIDROGRAMA

##### 4.4.1 Influência da altura do edificado para uma ocupação de 15%

Para cada combinação de declividades transversal e longitudinal, avaliou-se a influência da variação da altura das edificações (15 cm e 30 cm) para uma ocupação de 15% da área, na resposta dos hidrogramas produzidos. Pela Figura 4.10 é possível observar os hidrogramas para as combinações de declividades (transversal  $\times$  longitudinal): 2,5% $\times$ 2,5%, 2,5% $\times$ 5,0%, 2,5% $\times$ 10,0%, 5,0% $\times$ 2,5%, 5,0% $\times$ 5,0% e 5,0% $\times$ 10,0%.

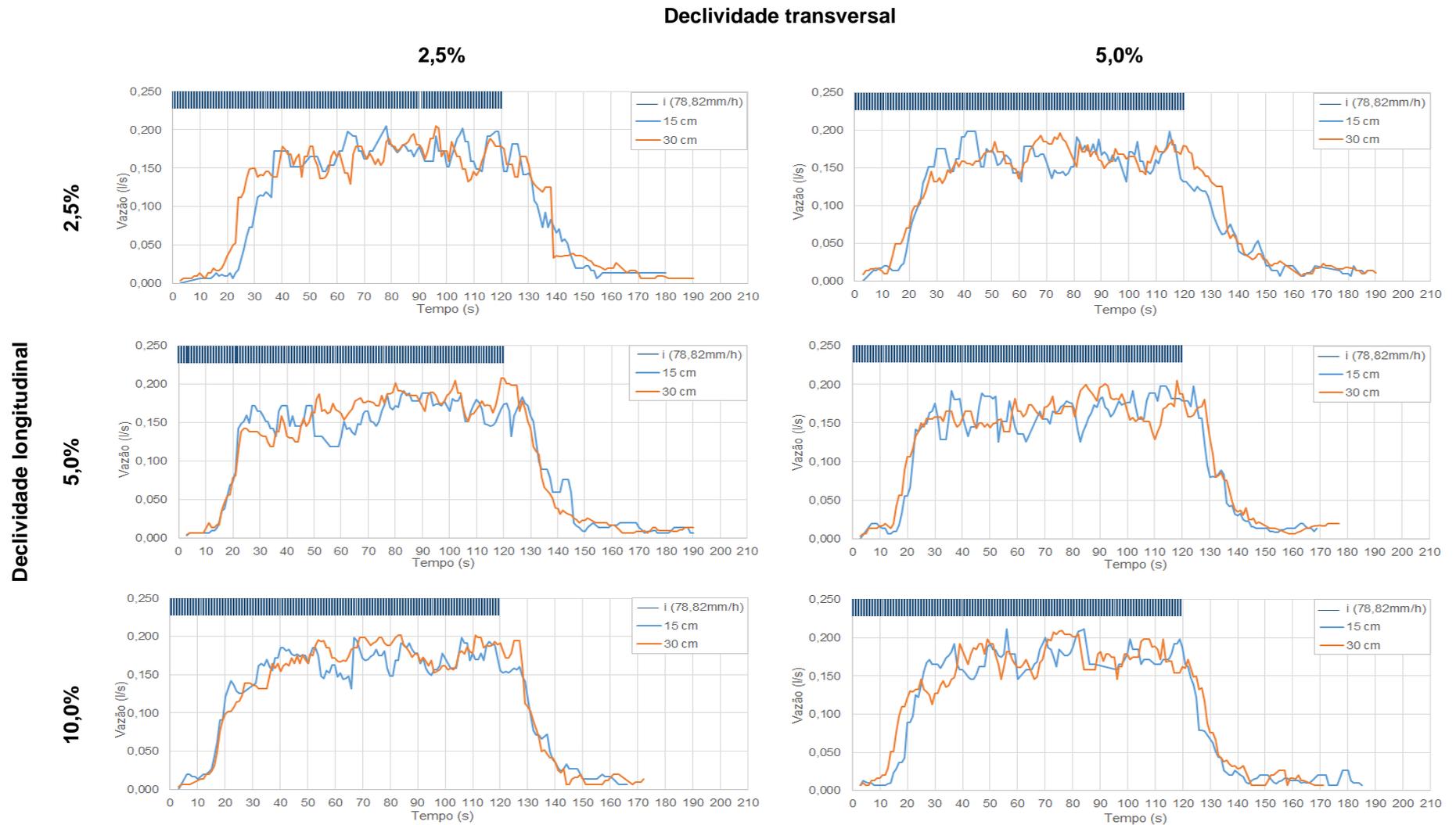


Figura 4.10 - Hidrogramas para diferentes declividades longitudinais e transversais, com 15% de edificações e alturas de 15 e 30 cm.

Fonte: Da autora.

Observou-se nos tempos extraídos dos hidrogramas (Figura 4.10), uma diferença no tempo de base, como pode ser observado na Tabela 4.9, que com o aumento da altura das edificações, propiciou o aumento de tempo de escoamento.

Tabela 4.9 - Valores dos tempos para as duas alturas de edificações (15 e 30 cm) com uma densidade de ocupação de 15%.

Tempos (s)	Combinções de declividades ( <i>Transversal x Longitudinal</i> )											
	2,5% $\times$ 2,5%		2,5% $\times$ 5,0%		2,5% $\times$ 10,0%		5,0% $\times$ 2,5%		5,0% $\times$ 5,0%		5,0% $\times$ 10,0%	
	Alturas de edificações (cm)											
	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30
$t_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$t_1$	17	22	10	10	10	11	11	14	10	14	6	11
$t_2$	40	37	37	24	19	20	26	25	24	24	23	25
$t_3$	119	127	125	133	125	123	125	125	111	125	119	122
$t_4$	141	147	144	147	144	145	144	152	133	140	140	141
$t_5=t_b$	165	177	161	193	165	163	172	185	156	165	168	182
$t_c$	45	57	41	73	45	43	52	65	36	45	48	62

Fonte: Da autora.

Observou-se que para um cenário de 15% de densidade, com o aumento da altura das edificações, ocorreu um aumento do tempo de concentração. Esse acréscimo médio foi de 36,78%, comportamento não observado na combinação de declividades de 2,5% $\times$ 10,0%. Observou-se que em relação ao tempo  $t_2$ , não se obteve um padrão no comportamento.

Comparou-se com os valores de vazão teórica de 0,175 L $\cdot$ s<sup>-1</sup>, com os valores de patamar, consideradas os picos, observados para os diferentes cenários, encontrando uma variação média de 4,45%. Esses valores são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Valores da vazão de patamar para as combinações de declividades e alturas de edificações para uma densidade de 15%.

Combinações de declividades ( <i>Transversal x Longitudinal</i> )	Vazão de patamar (L·s <sup>-1</sup> )	
	Edifícios baixos (15 cm)	Edifícios altos (30 cm)
2,5%×2,5%	0,171	0,162
2,5%×5,0%	0,163	0,168
2,5%×10,0%	0,167	0,175
5,0%×2,5%	0,161	0,166
5,0%×5,0%	0,167	0,165
5,0%×10,0%	0,175	0,167

Fonte: Da autora.

#### 4.4.2 Influência da altura do edificado para uma ocupação de 30%

A mesma análise foi realizada para uma ocupação de 30%. Para cada combinação de declividades transversal e longitudinal, avaliou-se a influência da variação da altura das edificações (15 cm e 30 cm) na resposta dos hidrogramas produzidos. Verifica-se na Figura 4.11, os hidrogramas para as combinações de declividades (transversal x longitudinal): 2,5%×2,5%, 2,5%×5,0%, 2,5%×10,0%, 5,0%×2,5%, 5,0%×5,0 e 5,0%×10,0%.

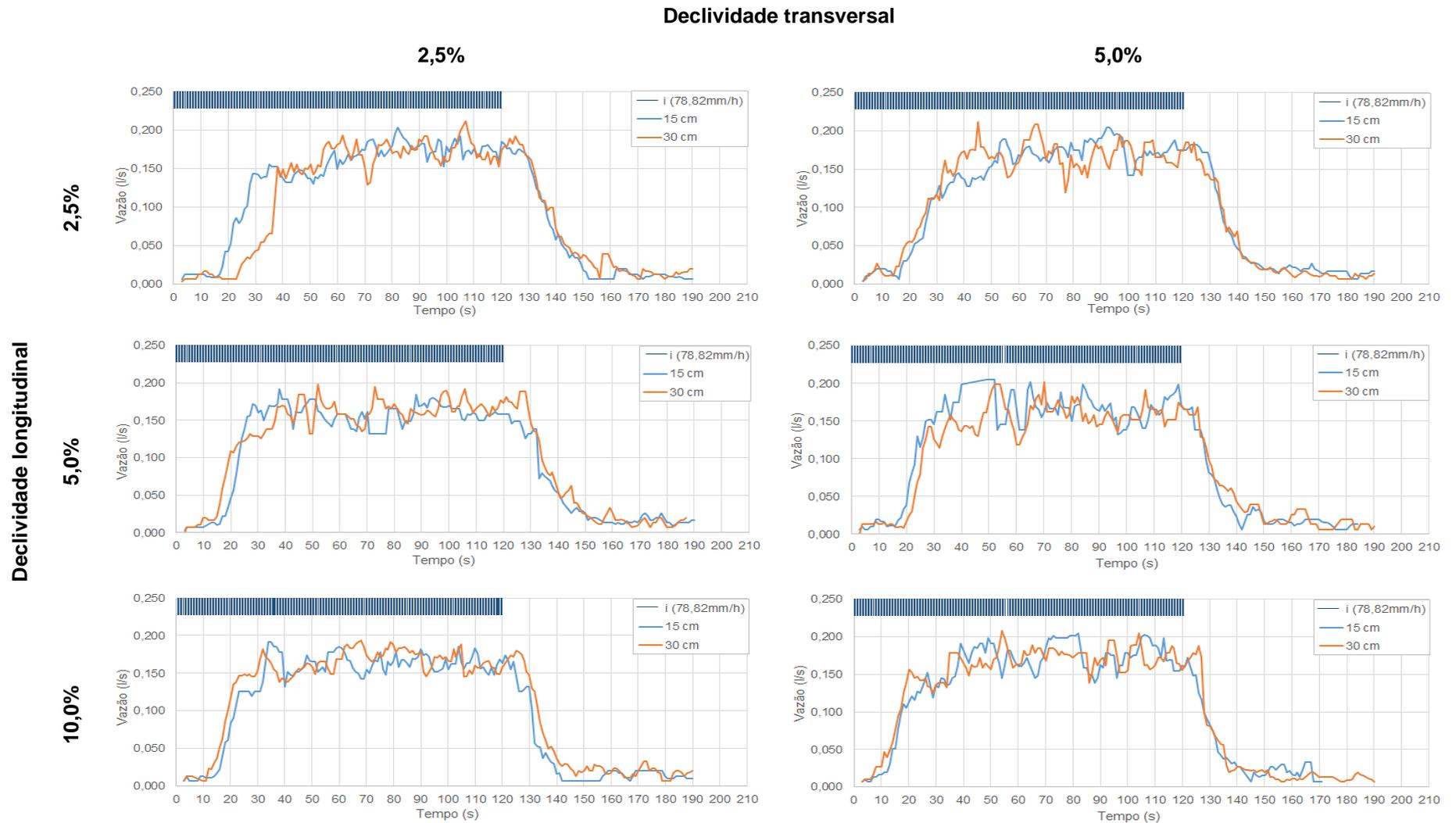


Figura 4.11 - Hidrogramas para diferentes declividades longitudinais e transversais, com 30% de edificações e alturas de 15 e 30 cm.

Fonte: Da autora.

Observou-se nos tempos extraídos dos hidrogramas (Figura 4.11), uma diferença no tempo de base, como pode ser verificado na Tabela 4.11, que com o aumento da altura das edificações propiciou o aumento de tempo de escoamento.

Tabela 4.11 - Valores dos tempos para as duas alturas de edificações (15 e 30 cm) com uma densidade de ocupação de 30%.

Tempos (s)	Combinções de declividades ( <i>Transversal x Longitudinal</i> )											
	2,5% $\times$ 2,5%		2,5% $\times$ 5,0%		2,5% $\times$ 10,0%		5,0% $\times$ 2,5%		5,0% $\times$ 5,0%		5,0% $\times$ 10,0%	
	Alturas de edificações (cm)											
	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30
$t_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$t_1$	14	20	13	12	11	10	14	11	15	19	12	12
$t_2$	28	37	23	36	29	20	28	33	24	28	18	15
$t_3$	128	130	127	130	125	127	130	129	125	126	124	124
$t_4$	150	153	151	153	139	144	147	148	139	151	145	136
$t_5=t_b$	187	194	195	191	190	198	193	192	181	196	168	192
$t_c$	67	74	75	71	70	78	73	72	61	76	48	72

Fonte: Da autora.

Com o acréscimo da altura das edificações, para o cenário de 30% de densidade, observou-se uma diminuição média de 44%, no tempo  $t_2$ , para as menores declividades transversais (2,5% e 5,0%).

Comparou-se com os valores de vazão teórica de 0,175 L·s<sup>-1</sup>, com os valores de patamar, consideradas os picos, observados para os diferentes cenários, encontrando uma variação média de 5,87%. Esses valores são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Valores da vazão de patamar para as combinações de declividades e alturas de edificações para uma densidade de 30%.

<b>Combinações de declividades</b> <i>(Transversal x longitudinal)</i>	<b>Vazão de patamar (L·s<sup>-1</sup>)</b>	
	<b>Edifícios baixos (15 cm)</b>	<b>Edifícios altos (30 cm)</b>
2,5%x2,5%	0,166	0,169
2,5%x5,0%	0,160	0,166
2,5%x10,0%	0,163	0,166
5,0%x2,5%	0,167	0,166
5,0%x5,0%	0,166	0,158
5,0%x10,0%	0,165	0,167

Fonte: Da autora.

## 5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Um dos principais problemas em áreas urbanas é a resposta hidrológica de uma área urbanizada ser mais rápida quando em comparação com áreas naturais. Da análise aos resultados das simulações laboratoriais descritas neste trabalho é possível inferir que a variação da altura de edifícios, a variação da densidade de ocupação e a variação de declividades longitudinais e transversais, influenciam o escoamento superficial em um ambiente urbano (superfícies impermeáveis), em especial no que diz respeito aos tempos dos hidrogramas.

Os resultados obtidos do simulador de chuva ( $CuC = 78,6\%$ ) indicam que é possível simular chuva de forma confiável para as condições avaliadas. A intensidade média de precipitação obtida com a sobreposição dos bicos,  $79,5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , é compatível com os valores utilizados nos projetos de microdrenagem urbana. O modelo físico possibilita várias combinações de declividade que permite representar uma bacia urbana impermeável.

Os experimentos descritos neste trabalho mostram que a esperada diminuição do tempo de ascensão dos hidrogramas em função das declividades foi evidenciada em todas as configurações investigadas, permitindo concluir que a influência da declividade foi fortemente observada nesse trabalho. Essa influência foi mais sensível para baixas declividades, diminuindo o efeito e igualando os resultados, à medida que se aumentou as declividades, principalmente as longitudinais. O aumento da declividade longitudinal produz uma diminuição do tempo de escoamento sensivelmente maior, para a menor declividade transversal estudada, para superfícies impermeáveis sem edificações. Com o acréscimo da declividade transversal, ocorreu uma diminuição no tempo de ascensão, observada nas declividades longitudinais de 2,5% e 5,0%, com redução de 35,00% e 35,10%, respectivamente, mas não foi observada na declividade longitudinal de 10,0%.

Conclui-se, também, que a densidade e altura das edificações retardam a resposta hidrológica de uma bacia urbana com superfícies impermeáveis. Verificou-se que os tempos de concentração aumentaram em 40% e 39% com a inserção das edificações para as densidades de 15% e 30% respectivamente. Em um cenário crítico, com prédios altos e densos, o aumento do tempo de concentração foi em média 55% quando comparados com o cenário sem edificações, isso sugere uma

resposta hidrológica mais lenta em função do aumento da altura dos edifícios, provavelmente devido ao aumento no tempo de percurso do escoamento (aumento do tempo de concentração), pois as gotas de chuva que atingem as fachadas dos edifícios demoram mais tempo a atingir a superfície do modelo, além de uma provável retenção superficial.

O valor da vazão de pico/patamar observado em todos os experimentos é muito próximo do valor calculado teoricamente pelo método racional, indicando que a metodologia utilizada é adequada para análises do escoamento em modelos reduzidos.

Como desenvolvimentos futuros a este trabalho, propõe-se experimentos de laboratório para cobrir uma ampla gama de condições, incluindo outros padrões de superfícies, tanto do modelo físico, como dos edifícios, novos padrões de intensidade de precipitação, alteração ao uso do solo, por exemplo, através da simulação de pavimentos permeáveis, análise de fluxo de escoamento para diferentes declividades e sistema de microdrenagem urbana. É também sugerido para trabalhos futuros o desenvolvimento e/ou a aplicação de um modelo numérico bidimensional que permita, simular computacionalmente os hidrogramas obtidos com os ensaios em modelo físico.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, J. E.; KIRKHAM, D.; NIELSON, D. R. A portable rainfall simulator infiltrometer and physical measurement of soil in place. **Soil Science Society of America, Proceedings**, v.21, p.473-477, 1957.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Medição de descarga líquida em grandes rios: manual técnico**. Brasília: ANA, SGH, 2009.
- AKSOY, H.; et al. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume. **Catena**, v.98, p.63-72, 2012.
- ANTROP, M. Background concepts for integrated landscape analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.77, n.1-2, p.17-28, 2000.
- ANTROP, M. Landscape change and the urbanization process in Europe. **Landscape and Urban Planning**, v.67, p.9-26, 2004.
- BARBASSA, A. P. **Simulação do efeito da urbanização sobre a drenagem pluvial da cidade de São Carlos**.1991. 327 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.
- BARNES, O. F.; COSTEL, G. A mobile infiltrometer. **Agronomy Journal**, v.49, p.105-107, 1957.
- BASTOS, P. C. **Efeitos da urbanização sobre vazões de pico de enchente**. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)–Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.
- BOOTH, D. B. Urbanization and the natural drainage system: Impacts, solutions and prognoses. **The Northwest Environmental Journal**, Washington, v.7, n.1, 1991.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. rev. São Paulo: Person Prentice Hall, 2008.
- CAMPANA, N. A.; et al. Influência de Aspectos Construtivos e de Uso na Eficiência de Revestimentos com Superfícies Permeáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.14, n.1, p.123-134, Jan/Mar, 2009.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- CARVALHO, S. C. P.; DE LIMA, J. L. M. P.; DE LIMA, M. I. P. Using meshes to change the characteristics of simulated rainfall produced by spray nozzles. **International Soil and Water Conservation Research (ISWCR)**, v.2, n.2, 2014.

CEA, L.; GARRIDO, M.; PUERTAS J. Experimental validation of two-dimensional depth-averaged models for forecasting rainfall–runoff from precipitation data in urban areas. **Journal of Hydrology**, v.382, p.88–102, 2010.

CECH, T.V. **Recursos Hídricos: história, desenvolvimento, política e gestão**. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CHOW, V. T.; YEN, B. C. A laboratory watershed experimental system. **Hydraulic Engineering Series**, v. 111, n. 27, p.1-196, 1974.

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. 225 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CHRISTIANSEN, J. E. The uniformity of application of water by sprinkler systems. **Agricultural Engineering**, v.22, p.89-92, 1941.

DE LIMA, J.L.M.P.; SINGH, V.P. Laboratory experiments on the influence of storm movement on overland flow. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.28, n.6-7, p.277-282, 2003.

DE LIMA, J. L.M.P.; SINGH, V. P.; DE LIMA, M.I.P. The influence of storm movement on water erosion: storm direction and velocity effects. **Catena**, v. 52, p. 39-56, 2003.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Managing Wet Weather with Green Infrastructure**. 2008. Disponível em: <[http://water.epa.gov/infrastructure/greeninfrastructure/upload/gi\\_action\\_strategy.pdf](http://water.epa.gov/infrastructure/greeninfrastructure/upload/gi_action_strategy.pdf)>. Acesso em: 16 jan. 2015.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. 2015. Disponível em: <<http://water.epa.gov/polwaste/green/>>. Acesso em: 16 jan. 2015.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **The causal analysis/diagnosis decision information system**. CADDIS Volume 2: Sources, Stressors & Responses, Urbanization Module. [2012]. Disponível em: <[http://www.epa.gov/caddis/ssr\\_urb\\_intro.html](http://www.epa.gov/caddis/ssr_urb_intro.html)>. Acesso em: 16 jan. 2015.

FARIA, N. O. **Estudo da impermeabilização, monitoramento, modelagem e simulação de cenários para a bacia do Barbado - Cuiabá/MT**. 2013. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana)–Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

FISTER, W. et al. A portable wind and rainfall simulator for in situ soil erosion measurements. **Catena**, doi:10.1016/j.catena.2011.03.002, 2011.

FISTER, W.; RIES, J.B. Wind erosion in the central Ebro Basin under changing land use management: Field experiments with a small, portable wind tunnel. **Journal of Arid Environments**, v.73, p.996–1004, 2009.

GABRIELS, D; DeBOODT, M. A rainfall simulator for soil erosion studies in the laboratory. **Pedologie**, v. 25, n.2, p.80-86, 1975.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1988.

GARCIA, J. I. B. **Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia hidrográfica do Arroio Cancela**. 2005. 169 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria,2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE - **Censo Demográfico 1980, 1991, 2000 e 2010 e contagem de população em 1996**. [2010]. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php>>. Acesso em 15 jan. 2015.

ISERLOH, T. et al. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. **Catena**, v.110, p.100–112, 2013.

ISIDORO, J. M.G.P.; DE LIMA, J. L.M.P.; LEANDRO, J. Influence of wind-driven rain on the rainfall-runoff process for urban areas: Scale model of high-rise buildings. **Urban Water Journal**, v.9, n.3, p.199-210, 2012.

ISIDORO, J.M.G.P.; DE LIMA, J.L.M.P.; LEANDRO J. The study of rooftop connectivity on the rainfall-runoff process by means of a rainfall simulator and a physical model. **Zeitschrift für Geomorphologie**, DOI: 10.1127/0372-8854/2012/S-00080, 2013.

ISIDORO, J.M.G.P.; DE LIMA, J.L.M.P. Laboratory simulation of the influence of building height and storm movement on the rainfall-runoff process in impervious áreas. **Journal of Flood Risk Management**, DOI: 10.1111/jfr3.12030, 2013.

ISIDORO, J. M. G. P. **Modelling the influence of storm movement and wind-driven rainfall on overland flow in urban areas**. 2012. 207 f. Tese. (Doutorado em engenharia civil com ênfase em hidráulica, recursos hídricos e ambiente)–Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.

KINNELL, P. I. A. Splash erosion: Some observations with a splash cup technique. **Soil Science Society of America**, v.38, p.657-660, 1974.

MELLO, C.R.; SILVA, A.M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: Editora UFLA, 2013.

MELLO, C.R.; VIOLA, M. R. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Comissão de Pedometria, Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.37-44, 2012.

MONTEBELLER, C. A.; et al. Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.1-5; Campina Grande, PB, 2001.

MUTCHLER, C. K.; MOLDENHAUER, W. C. Applicator for laboratory rainfall simulator. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v.6, p.220-222, 1963.

NETO, J.F. et al. Influência da pressão na intensidade e uniformidade da distribuição de precipitação em um simulador de chuva. **Agropecuária Técnica**, v.7, 1986.

NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION- NCDC-NOAA. [2015]. Disponível em: <[http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/global-maps/201401?products\[\]=map-prcp](http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/global-maps/201401?products[]=map-prcp)>. Acesso em: 15 abr. 2015.

PALL, R. et al. Development and Calibration of a Rainfall Simulator. **Canada Agriculture Engineering**, v. 25, p.181-187, Guelph, 1983.

PIO, E.D. **Regionalização do hidrograma unitário sintético e dos coeficientes do hidrograma unitário sintético de Snyder para pequenas bacias rurais do Estado de São Paulo**. 1999. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Universidade de Campinas, Campinas, 1999.

RAN, Q. et al. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion; **Journal of Hydrology**, 2012.

REIS, R.J.; GUIMARÃES, D.P.; LANDAU, E.C. **Chuvas em Minas Gerais**. Belo Horizonte: Editora PUC MINAS, 2012.

RIGHETTO, A.M. **Hidrologia e recursos hídricos**. 3. ed. São Carlos: EESC/USP, 1998.

ROMKENS, M. J. M. et al. A laboratory rainfall simulator for infiltration and soil detachment studies. **Soil Science Society of America, Proceedings**, v.39, p.158-160, 1975.

SHAMMAS, N.K.; WANG, L.K. **Abastecimento de água e remoção de resíduos**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SHERMAN, L.K. The hydraulics of surface runoff. **Civil Engineering**, v.10, p.1675-1686, New York, 1932.

SHINMA, T. A. **Calibração multiobjectivo do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão**. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)– Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SOUSA PINTO, N.L. et al. **Hidrologia básica**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.

SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento urbano de baixo impacto: planejamento e tecnologias verdes para a sustentabilidade das águas urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.17, n.2, Abr/Jun, p. 9-18, 2012.

SOUZA JUNIOR, S.F.; SIQUEIRA, E.Q. Development and calibration of a rainfall simulator for urban hydrology research. **12th International Conference on Urban Drainage**, set., p.11-16, Porto Alegre/Brazil, 2011.

TUCCI, C. E. M. (Org). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS, 2004.

VIEIRA, J. V.; et al. Análise de viabilidade para uso de pavimentos permeáveis como dispositivo de controle de escoamento superficial. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2013.

WILSON, T. G. et al. Development and testing of a large, transportable rainfall simulator for plot-scale runoff and parameter estimation. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.18, p.4169–4183, 2014.

WALKER, P. H. et al. Use of versatile experimental system for soil erosion study. **Soil Science Society of America, Journal**, v.41, p.610-612, 1977.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - W.M.O. **Manual for estimation of probable maximum precipitation**. Geneva: WMO, 2009.

## APÊNDICE A – Montagem do simulador



Figura A. 1: Montagem do simulador de chuva com um bocal tipo FullJet® HH- W ¼

Fonte: Da autora

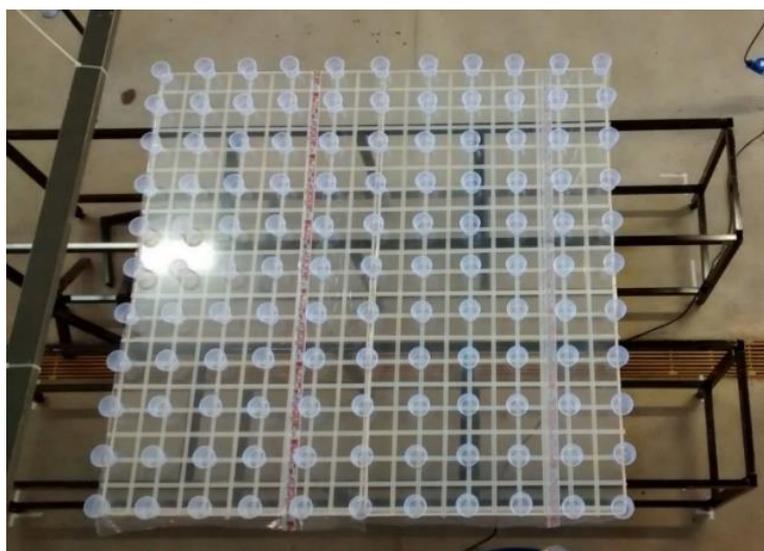


Figura A. 2: Distribuição espacial dos recipientes área de ensaio de 4,00 m<sup>2</sup>.

Fonte: Da autora



Figura A. 3: Montagem do simulador de chuva com dois bocais do tipo FullJet® HH-W ¼.

Fonte: Da autora



Figura A. 4: Três bocais em funcionamento

Fonte: Da autora

## APÊNDICE B – Resultados gerais do simulador

Tabela B. 1: Valores da altura precipitada (mm) em cada recipiente, para um bocal instalado.

200 cm	10.00	10.91	12.07	13.54	14.77	15.75	15.75	13.97	12.41	12.19	11.36
180 cm	10.79	12.26	14.02	15.82	17.67	19.06	18.89	17.69	15.08	13.01	11.98
160 cm	11.85	14.03	16.63	18.75	20.12	20.90	21.46	20.43	16.97	14.02	12.42
140 cm	12.80	15.76	18.60	20.42	20.93	21.28	21.71	21.48	18.48	14.92	12.86
120 cm	13.35	16.63	20.09	21.01	20.70	20.45	21.31	22.03	19.04	15.28	13.06
100 cm	13.13	16.71	20.48	20.86	20.26	21.61	21.19	21.77	18.63	15.31	13.17
80 cm	12.20	15.01	19.04	20.50	20.11	20.71	21.41	20.22	17.55	14.81	13.19
60 cm	11.35	13.39	16.28	18.82	19.94	20.46	19.67	18.08	16.07	14.20	12.24
40 cm	10.76	12.17	13.67	15.17	16.60	17.21	17.01	15.85	14.62	13.47	12.65
20 cm	10.45	11.26	12.10	13.11	14.10	14.75	14.70	14.16	13.34	12.85	12.69
0 cm	10.23	10.65	11.26	11.86	12.53	13.12	13.11	13.07	12.78	12.59	12.63
	0 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm	140 cm	160 cm	180 cm	200 cm

Fonte: Da autora

Tabela B. 2: Valores da intensidade de precipitação média (mm.h<sup>-1</sup>) em cada recipiente, para um bocal instalado.

200 cm	27.26	29.74	32.90	36.93	40.28	42.95	42.95	38.08	33.83	33.25	30.99
180 cm	29.43	33.44	38.22	43.13	48.18	51.96	51.51	48.24	41.12	35.47	32.65
160 cm	32.30	38.25	45.35	51.11	54.86	56.99	58.52	55.70	46.27	38.24	33.87
140 cm	34.91	42.97	50.72	55.67	57.06	58.02	59.20	58.57	50.38	40.68	35.07
120 cm	36.41	45.33	54.78	57.29	56.45	55.75	58.09	60.07	51.90	41.65	35.61
100 cm	35.79	45.55	55.83	56.89	55.24	58.93	57.76	59.37	50.79	41.74	35.92
80 cm	33.28	40.93	51.90	55.89	54.83	56.46	58.37	55.13	47.86	40.39	35.97
60 cm	30.96	36.50	44.38	51.31	54.35	55.79	53.64	49.30	43.81	38.71	33.37
40 cm	29.35	33.17	37.26	41.35	45.27	46.93	46.37	43.22	39.86	36.72	34.48
20 cm	28.50	30.71	32.99	35.74	38.44	40.21	40.07	38.59	36.37	35.04	34.61
0 cm	27.89	29.03	30.70	32.32	34.16	35.78	35.75	35.62	34.84	34.34	34.45
	0 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm	140 cm	160 cm	180 cm	200 cm

Fonte: Da autora

Tabela B. 3: Simulação de 3 bocais realizada através da sobreposição.

200 cm	27.26	29.74	32.90	36.93	40.28	70.21	72.70	70.98	70.76	73.53	144.14	72.70	70.98	70.76	73.53	73.94	42.95	38.08	33.83	33.25	30.99
180 cm	29.43	33.44	38.22	43.13	48.18	81.38	84.94	86.46	84.25	83.65	165.99	84.94	86.46	84.25	83.65	84.61	51.51	48.24	41.12	35.47	32.65
160 cm	32.30	38.25	45.35	51.11	54.86	89.29	96.77	101.06	97.38	93.09	180.15	96.77	101.06	97.38	93.09	90.86	58.52	55.70	46.27	38.24	33.87
140 cm	34.91	42.97	50.72	55.67	57.06	92.93	102.17	109.28	106.06	97.74	186.03	102.17	109.28	106.06	97.74	93.09	59.20	58.57	50.38	40.68	35.07
120 cm	36.41	45.33	54.78	57.29	56.45	92.16	103.42	114.85	109.19	98.10	183.52	103.42	114.85	109.19	98.10	91.36	58.09	60.07	51.90	41.65	35.61
100 cm	35.79	45.55	55.83	56.89	55.24	94.73	103.31	115.20	107.68	96.98	189.58	103.31	115.20	107.68	96.98	94.85	57.76	59.37	50.79	41.74	35.92
80 cm	33.28	40.93	51.90	55.89	54.83	89.73	99.30	107.03	103.75	95.22	182.17	99.30	107.03	103.75	95.22	92.43	58.37	55.13	47.86	40.39	35.97
60 cm	30.96	36.50	44.38	51.31	54.35	86.74	90.14	93.68	95.12	93.06	175.90	90.14	93.68	95.12	93.06	89.16	53.64	49.30	43.81	38.71	33.37
40 cm	29.35	33.17	37.26	41.35	45.27	76.28	79.54	80.48	81.21	81.99	157.70	79.54	80.48	81.21	81.99	81.42	46.37	43.22	39.86	36.72	34.48
20 cm	28.50	30.71	32.99	35.74	38.44	68.70	70.78	71.59	72.12	73.48	143.52	70.78	71.59	72.12	73.48	74.82	40.07	38.59	36.37	35.04	34.61
0 cm	27.89	29.03	30.70	32.32	34.16	63.67	64.78	66.32	67.16	68.50	133.89	64.78	66.32	67.16	68.50	70.23	35.75	35.62	34.84	34.34	34.45
	0 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm	140 cm	160 cm	180 cm	200 cm	220 cm	240 cm	260 cm	280 cm	300 cm	320 cm	340 cm	360 cm	380 cm	400 cm

Fonte: Da autora



## APÊNDICE C - Cenários ensaiados



Figura C. 1: Cenário com 15% de densidade de edificações.

Fonte: Da autora.



Figura C. 2: Cenário com 15% de densidade de edificações baixas (15 cm).

Fonte: Da autora.



Figura C. 3: Cenário com 15% de edificações altas (30cm).

Fonte: Da autora.



Figura C. 4: Cenário com declividades de 5,0%x10,0% e 15% de ocupação com edificações altas.

Fonte: Da autora.



Figura C. 5: Cenário com 30% de densidade de edificações.

Fonte: Da autora.



Figura C. 6: Cenário com declividades de 5,0%x10,0% e 30% de ocupação com edificações baixas.

Fonte: Da autora.



Figura C. 7: Cenário com 30% de densidade de edificações baixas (15 cm).

Fonte: Da autora.



Figura C. 8: Cenário com 30% de edificações altas (30cm).

Fonte: Da autora.