

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**MARCELO HENRIQUE DE CASTRO**

**ESTUDO DO PROCESSO DE INFILTRAÇÃO EM SUPERFÍCIES  
PERMEÁVEIS A PARTIR DE UM SIMULADOR DE CHUVA POR ASPERSÃO**

**PALMAS - TO**

**2019**

MARCELO HENRIQUE DE CASTRO

**ESTUDO DO PROCESSO DE INFILTRAÇÃO EM SUPERFÍCIES  
PERMEÁVEIS A PARTIR DE UM SIMULADOR DE CHUVA POR ASPERSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. Área de Concentração: Saneamento e Recursos Hídricos.

**Orientador:** Prof. Dr. Rui da Silva Andrade  
**Coorientadora:** Prof. Dr.<sup>a</sup> Rose Mary Gondim Mendonça

**PALMAS - TO**

**2019**

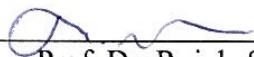
## FOLHA DE APROVAÇÃO

MARCELO HENRIQUE DE CASTRO

ESTUDO DO PROCESSO DE INFILTRAÇÃO EM SUPERFÍCIES PERMEÁVEIS A PARTIR DE UM SIMULADOR DE CHUVA POR ASPERSÃO

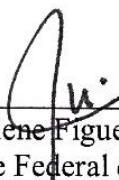
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

### BANCA EXAMINADORA



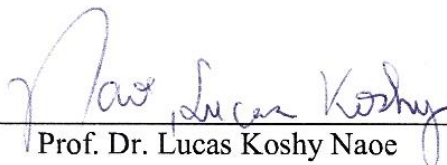
---

Prof. Dr. Rui da Silva Andrade  
Universidade Federal do Tocantins (Presidente)



---

Prof. Dr. Girlene Figueiredo Maciel  
Universidade Federal do Tocantins



---

Prof. Dr. Lucas Koshy Nao  
Fundação Universidade do Tocantins

Aprovada em: 12 de março de 2019

Local de defesa: sala 202 do bloco J

Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Palmas

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

C355e Castro, Marcelo Henrique de.

Estudo do processo de infiltração em superfícies permeáveis a partir de um simulador de chuva por aspersão. / Marcelo Henrique de Castro. – Palmas, TO, 2019.

102 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2019.

Orientador: Rui da Silva Andrade

Coorientadora : Rose Mary Gondim Mendonça

1. Infiltração. 2. Simulador de chuva. 3. Superfícies permeáveis. 4. Escoamento superficial. I. Título

**CDD 628**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

**Dedico à Deus, família, amigos e  
a meu irmão Fernando (in  
memorian).**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me abençoado grandemente em todos os caminhos a qual eu já trilhei e especialmente nessa minha jornada acadêmica dentro do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins. Agradeço a minha mãe (Cleide) e meu pai (Clovis), que sempre estiveram ao meu lado nas escolhas que fiz e me deram o apoio necessário para que eu pudesse chegar até firmado em uma estrutura familiar sólida. Agradeço ao meu irmão Raian, que sempre esteve disposto a me auxiliar no que fosse preciso. E aos meus outros irmãos Walas, Júnior e Paulo.

À Islaia Milena, minha namorada, pela grande ajuda concedida durante os experimentos, na parte escrita e pelo incentivo nos momentos difíceis.

Ao Professor Dr. Rui da Silva Andrade por ter aceitado me orientar no Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins e pela paciência e preocupação com o desenvolvimento do trabalho.

À Professora Dr. Rose Mary Gondim Mendonça, pela coorientação, ensinamentos repassados, amizade, por ter se empenhado consideravelmente para que esse trabalho fosse feito e estar sendo minha ajudadora desde minha primeira bolsa de PIBIC até a pós-graduação. Também lhe agradeço pelo uso do espaço físico do Laboratório de Geologia e Geomorfologia e seus equipamentos.

Ao Leilivan Pimental pela imensa ajuda, amizade, companheirismo e sobretudo dedicação ao projeto desenvolvido com as unidades experimentais no ano de 2014.

Ao Hélio Lopes pela grande contribuição durante a minha graduação e Mestrado. Demonstrou ser um amigo para as horas difíceis.

À minha tia Célia e meu tio Valdeclei pela confiança, apoio e carinho.

Ao Hélio Cardoso e Welton pelo convívio diário, amizade, apoio, companheirismo e ajuda como um todo.

À Universidade Federal do Tocantins (UFT) pelo curso de Engenharia Ambiental que mantém.

Aos professores do colegiado do curso de Engenharia Ambiental da UFT e por outros professores que fizeram parte da minha graduação.

Aos amigos Fábio, Jonatas, Alef e Fernanda pela ajuda diversa.

Aos parentes pelo apoio e confiança.

À turma 2016/1 do Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental pelos momentos que passamos juntos.

Aos meus amigos de Balsas/MA e de Palmas/TO.

À UNITINS (Fundação Universidade do Tocantins) na pessoa do professor Expedito.

Aos meus amigos da Sibapa (Segunda Igreja Batista de Palmas).

Aos amigos do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Tocantins pelo apoio e consideração.

Ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Tocantins por me conceder licença pra conclusão de curso no prazo de dez dias.

Ao Senhor José, Derico e Antônio prestadores de serviço para UFT.

À técnica do Laboratório de Geologia da UFT, Alessandra pela amizade, companheirismo e pela grande ajuda na análise estatística dos dados.

Ao Laboratório de Engenharia de Minas da ULBRA na pessoa do técnico Fábio.

Aos vigilantes da Empresa Jorima, em especial aos Senhores Edson, Vilmar e Paulo.

À todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui, se esqueci de alguém, me perdoe mas tenho que ser sucinto. Obrigado a todos e que Deus os abençoe grandemente.

*Então Samuel pegou uma pedra e a ergueu entre Mispá e Sem; e deu-lhe o nome de Ebenézer, dizendo: "Até aqui o Senhor nos ajudou". 1 Samuel 7:12*



## RESUMO

Este trabalho teve como proposta construir um simulador de chuva para estudos do processo de infiltração em superfícies permeáveis. Primeiro foi necessário construir o simulador de chuvas e fazer sua calibração levando em consideração uniformidade de aplicação, intensidade real, diâmetro médio da gota e energia cinética gerados pelo simulador para o aspersor e a pressão de trabalho escolhidos. Posteriormente, usou o simulador construído para simular chuvas sobre três superfícies permeáveis: blocos de concreto poroso, blocos maciços de concreto convencional e solo exposto. Na construção do simulador de chuva destaca-se alguns pontos: dentre os bicos aspersores analisados o 1/2 HH-36SQ foi o que apresentou o melhor Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, o diâmetro médio da gota produzida pelo aspersor para pressão de 0,5 kgf/cm<sup>2</sup> foi de 2,23 mm, onde o simulador apresentou capacidade de produzir chuvas com energia cinética equivalente a 90% de uma chuva natural. Foram simuladas três precipitações com intensidade de 79,11 mm/h sobre cada tipo de superfície. Os dados de infiltração observados em todas as superfícies foram ajustados ao modelo de Horton. Empregou-se infiltrômetro de anéis concêntricos no solo para comparar a taxa de infiltração estável obtida com o uso do simulador de chuvas. Os valores encontrados para as taxas de infiltração estável com o uso dos anéis foram superiores aos valores vistos com simulador de chuvas. A superfície que apresentou as maiores taxas de infiltração estável (78,76, 78,69 e 78,57 mm/h) e os menores coeficientes de escoamento superficial (0,8840, 0,9121 e 0,7658) foi a com blocos de concreto poroso. Já a superfície com blocos maciços de concreto convencional foi a que teve os menores valores de taxa de infiltração estável (5,97, 1,31 e 1,19 mm/h) e os maiores coeficientes de escoamento superficial (0,9812, 0,9927 e 0,9895).

**PALAVRAS-CHAVE: simulador de chuva; escoamento superficial; superfícies permeáveis; infiltração.**

## ABSTRACT

This work had as a proposal to construct a rainfall simulator for studies of the infiltration process on permeable surfaces. First, it was necessary to build the rainfall simulator and make its calibration taking into account uniformity of application, real intensity, average drop diameter and kinetic energy generated by the simulator for the sprinkler and the work pressure chosen. Subsequently, the simulator built was used to simulate rainfall on three permeable surfaces: porous concrete blocks, concrete solid blocks and exposed soil. In the construction of the rainfall simulator stands out some points: among the sprinklers analyzed the 1/2 HH-36SQ was the one that presented the best Christiansen's Uniformity Coefficient, the mean diameter of the rain drop produced by the sprinkler for pressure of 0.5 kgf/cm<sup>2</sup> was 2.23 mm, where the simulator had the ability to produce rainfall with kinetic energy equivalent to 90% of natural rainfall. Three precipitations with intensity of 79.11 mm/h were simulated on each surface type. The infiltration data observed on all surfaces were adjusted to the Horton model. Double ring infiltrometer was used in the soil to compare the steady-state infiltration rate obtained with the use of the rainfall simulator. The values found for the steady-state infiltration rates with the use of the rings were higher than the values seen with rainfall simulator. The surface that presented the largest steady-state infiltration rates (78.76, 78.69 e 78.57 mm/h) and the lowest coefficients of runoff (0.8840, 0.9121 e 0.7658) was with porous concrete blocks. Already the surface with concrete solid blocks was the one that had the lowest values of steady-state infiltration rate (5.97, 1.31 e 1.19 mm/h) and the highest coefficients of runoff (0.9812, 0.9927 e 0.9895).

**KEYWORDS:** rainfall simulator; surface runoff; permeable surfaces; infiltration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamento do escoamento antes e depois da urbanização.....	23
Figura 2. Seção tipo de um pavimento permeável. ....	26
Figura 3. Simuladores por gotejamento.....	32
Figura 4. Exemplos de jato cone cheio (A) e jato leque (B). ....	33
Figura 5. Simuladores com bicos FullJet. ....	34
Figura 6. Simuladores com bicos VeeJet.....	34
Figura 7. Cobertura teórica do jato de água produzido por um aspersor. ....	37
Figura 8. Acessórios diversos.....	39
Figura 9. Forma e coletores usados para o teste do CUC.....	39
Figura 10. Forma coletora de chuva para o teste de intensidade. ....	41
Figura 11. Forma coletora de gotas usada no método da farinha (1), peneiramento da farinha de trigo sobre a lona plástica colocada sobre a forma (2) e forma preenchida com farinha de trigo (3). .....	42
Figura 12. Superfície com blocos de concreto poroso - BCP (1) e blocos maciços de concreto convencional - BM (2). ....	45
Figura 13. Localização das unidades experimentais do projeto. ....	45
Figura 14. Visão geral das unidades experimentais e vista superior em detalhe.....	46
Figura 15. Vistas de fundo, lateral e frontais em detalhe.....	47
Figura 16. Detalhe da calha coletora do escoamento superficial. ....	49
Figura 17. Simulador de chuva (1) e o reservatório de água móvel (2).....	49
Figura 18. Tubo posicionado sobre o aspersor (1) e balde coletor (2).....	49
Figura 19. Equipamentos usados nos testes (1), baldes coletores (2) e detalhe do Arduino (3)....	50
Figura 20. Forma cravada ao solo.....	51
Figura 21. Superfície do solo durante a chuva. ....	52
Figura 22. Cilindro fixado sobre os blocos de concreto. ....	52
Figura 23. Anéis concêntricos usados no teste de infiltração. ....	53
Figura 24. Vazão aspergida pelo bico 1/2HH-36SQ para diferentes pressões.....	58
Figura 25. Distribuição espacial da chuva para as três repetições realizadas usando o bico 1/2 HH-36SQ e pressão de 0,5 kgf/cm <sup>2</sup> . ....	60
Figura 26. Distribuição da quantidade de gotas amostradas por classe de diâmetro. ....	63

Figura 27. Volumes acumulados versus diâmetro médio de gota por classe amostrada. ....	63
Figura 28. Porcentagem de energia cinética produzida por cada classe de diâmetro de gota.....	64
Figura 29. Lâmina de água sobre o BM. ....	66
Figura 30. Gráficos com as taxas de escoamento superficial, infiltração observada, drenagem de fundo e intensidade de precipitação para simulações de chuva com BM (1ª, 2ª e 3ª simulações).	67
Figura 31. Ajuste do modelo de Horton aos dados observados para as simulações com BM.....	68
Figura 32. Gráficos com as taxas de escoamento superficial, infiltração observada, drenagem de fundo e intensidade de precipitação para simulações de chuva com BCP (1ª, 2ª e 3ª simulações). .....	71
Figura 33. Ajuste do modelo de Horton aos dados observados para as simulações com BCP. ...	72
Figura 34. Gráficos com as taxas de escoamento superficial, infiltração observada, drenagem de fundo e intensidade de precipitação para simulações de chuva nas parcelas de solo (SS1, SS2 e SS3). .....	75
Figura 35. Ajuste do modelo de Horton aos dados observados para as simulações com solo usando simulador.....	76
Figura 36. Ajuste do modelo de Horton aos dados observados para as simulações com solo usando anel. ....	78
Figura 37. Formação de crostas na superfície do solo. ....	80

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3. Bicos aspersores usados nos testes.....	37
Quadro 4. Lista de materiais usados na automação do simulador de chuvas.....	38
Quadro 5. Orçamento do simulador.....	94
Quadro 6. Determinação do número de gotas retidas por classe de gota.....	98
Quadro 7. Determinação do volume acumulado por classe de gota.....	98
Quadro 8. Determinação da energia específica no tempo. ....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores do CUC médio (%) em função da pressão e do bico adotado.....	57
Tabela 2. Valores das $I_m$ , $I_r$ , $I_m$ média, $I_r$ média, desvio padrão e erro relativo médio das chuvas simuladas para o bico 1/2HH-36SQ em diferentes pressões. ....	59
Tabela 3. Coeficientes de variação das $I_m$ e valor da $I_m$ mínima e máxima das três repetições para o bico 1/2 HH-36SQ e pressão de 0,5 kgf/cm <sup>2</sup> . ....	60
Tabela 4. Intensidades de chuva para Palmas – TO. ....	61
Tabela 5. Intensidade real em função do tempo de abertura e fechamento da válvula solenoide. ....	62
Tabela 6. Resultados para o BM.....	65
Tabela 7. Equações de ajuste para o modelo de Horton e índices estatísticos $R^2$ , CA e CMR calculados para as três simulações com BM. ....	69
Tabela 8. Valores da taxa de infiltração estável (TIE), desvio padrão e coeficiente de variação observados para as simulações com BM. ....	69
Tabela 9. Resultados para o BCP.....	70
Tabela 10. Equações de ajuste para o modelo de Horton e índices estatísticos $R^2$ , CA e CMR calculados para as três simulações com BCP. ....	73
Tabela 11. Valores da taxa de infiltração estável (TIE) observada para as simulações com BCP. ....	73
Tabela 12. Resultados das análises físicas e química das amostras de solo. ....	74
Tabela 13. Resultados para o solo exposto.....	74
Tabela 14. Equações e índices estatísticos calculados para as três simulações com solo usando simulador.....	77
Tabela 15. Valores da taxa de infiltração estável (TIE) observada para as simulações com solo usando simulador.....	77
Tabela 16. Equações e índices estatísticos calculados para as três simulações com solo usando anel concêntrico.....	78

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIÇÕES

A – Ampere

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Analise Of Variance

ASTM – American Society for Testing and Materials

$A_c$  – Área de captação do coletor

BCP – Bloco de Concreto Poroso

BM – Bloco Maciço

BMPs – Best Management Practices

C – Coeficiente de escoamento superficial

cm – Centímetro

Cn – Fator de conversão de unidades do sistema SI, com valor igual 4 583 666 000

CUC – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen

CV – Coeficiente de variação

$d$  – Diâmetro da gota (mm)

$D$  – Diâmetro interno do cilindro de infiltração (mm)

DN – Diâmetro nominal

DPL – Diâmetro de passagem livre

EEUFT – Estação Experimental da Universidade Federal do Tocantins

EPA – United States Environmental Protection Agency

EUA – Estados Unidos da América

$f$  – Taxa de infiltração

$f_c$  – Taxa de infiltração final em condições de saturação

$f_0$  – Taxa de infiltração inicial

g – Grama

GI – Green Infrastructure

h – Hora

Hz – Hertz

IDE – Integrated Development Environment

i-d-f – Intensidade-duração-frequência

$I_m$  – Intensidade média

$i$  – Intensidade da precipitação

$I$  – Intensidade da chuva

$I_c$  – Intensidade calculada

$I_r$  – Intensidade real

J – Joule

kg – Quilograma

kgf – Quilograma-força

$k$  – Constante de decaimento

$KE_n$  – Energia cinética de uma gota de diâmetro  $d$

$KE_i$  – Energia específica no tempo

$KE_p$  – Energia específica no volume

$k_p$  – Coeficiente de permeabilidade

L – Litro

LABMET – Laboratório de Meteorologia

LCD – Liquid Crystal Display

LED – Light Emitting Diode

LID – Low Impact Development

LIUDD – Low Impact Urban Design and Development

$m$  – Massa de água infiltrada

m – Metro

$m^2$  – Metro quadrado

mg – Miligrama

min – Minuto

mm – Milímetro

$mm^3$  – Milímetro cúbico

$M_g$  – Massa do grânulo de farinha

$M_g$  – Massa média da gota

MPa – Mega Pascal

$n$  – Número de coletores



$N_{An}$  – Número de gotas (de cada classe de diâmetro) por segundo que atinge uma superfície de  $1\text{m}^2$

NBR – Normas Brasileiras

$O_i$  – Valores observados

$\bar{O}$  – Média aritmética dos valores observados

$P_i$  – Valores estimados

PAST – Paleontological Statistics

Psi – Pound force per square inch

PVC – Policloreto de Vinila

$\rho$  – Massa específica da água

$R_p$  – Taxa de precipitação do aspersor

$R^2$  – Coeficiente de determinação

s – Segundo

S – Área da caixa coletora

SA1 – Solo com uso de anel – 1ª parcela

SA2 – Solo com uso de anel – 2ª parcela

SA3 – Solo com uso de anel – 3ª parcela

SS1 – Solo com uso do simulador de chuva – 1ª parcela

SS2 – Solo com uso do simulador de chuva – 2ª parcela

SS3 – Solo com uso do simulador de chuva – 3ª parcela

SuDS – Sustainable Drainage Systems

TA – Tempo de Abertura

TF – Tempo de Fechamento

TIE – Taxa de infiltração estável

TO – Tocantins

$t$  – Tempo

$t_d$  – Tempo de duração da chuva de projeto

$t_p$  – Tempo necessário para água percolar

$Tr$  – Tempo de retorno adotado

UFT – Universidade Federal do Tocantins

V – Volt

VIB – Velocidade de Infiltração Básica

$V_c$  – Volume coletado

$V_p$  – Volume retido em um coletor

$V_t$  – Velocidade terminal da gota

$X$  – Lâmina precipitada em um coletor

$\bar{X}$  – Média das lâminas precipitadas sobre os coletores

W – Watts

WSUD – Water Sensitive Urban Design

$\rho$  – Massa específica da água

$\pi$  – Constante Pi (aproximadamente 3,14)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
2.1	Objetivo Geral.....	22
2.2	Objetivos Específicos.....	22
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
3.1	Problemática .....	23
3.2	Drenagem urbana .....	24
3.3	Drenagem urbana sustentável .....	24
3.3.1	Pavimentos permeáveis .....	25
3.4	Precipitação .....	27
3.5	Infiltração .....	28
3.6	Simuladores de chuva .....	29
3.6.1	Tipos de simuladores.....	30
3.6.1.1	Gotejamento .....	31
3.6.1.2	Aspersão.....	32
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>36</b>
4.1	Montagem do simulador .....	36
4.2	Calibração do simulador .....	39
4.2.1	Uniformidade de aplicação dos aspersores .....	39
4.2.2	Determinação da intensidade média e intensidade real.....	40
4.2.3	Calibração da intensidade da chuva utilizando a válvula solenoide .....	42
4.2.4	Determinação do diâmetro da gota e da energia cinética.....	42
4.3	Execução das simulações .....	45
4.3.1	Localização .....	45
4.3.2	Infiltração com uso do simulador de chuva.....	48
4.3.2.1	Blocos de concreto poroso (BCP) e blocos maciços de concreto convencional (BM) .....	48
4.3.2.2	Solo .....	51
4.3.3	Ensaio de Permeabilidade in situ.....	52
4.3.4	Infiltrômetro de anel.....	53
4.3.5	Modelo de Horton .....	54
4.4	Análise estatística.....	55
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>57</b>

5.1	Avaliação do simulador.....	57
5.1.1	Uniformidade de aplicação.....	57
5.1.2	Intensidade média e real da chuva.....	58
5.1.3	Calibração da intensidade da chuva .....	61
5.1.4	Diâmetro da gota e energia cinética .....	63
5.2	Simulações de chuva sobre as superfícies.....	65
5.2.1	Blocos maciços de concreto convencional (BM) .....	65
5.2.2	Blocos de concreto poroso (BCP) .....	70
5.2.3	Solo .....	73
5.2.4	Visão geral das superfícies .....	81
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>83</b>
6.1	Simulador de chuva.....	83
6.2	Simulações de chuvas sobre as superfícies .....	83
<b>7</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>85</b>
7.1	Simulador de chuvas .....	85
7.2	Simulações de chuvas sobre as superfícies .....	85
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>86</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>94</b>
9.1	Orçamento .....	94
9.2	Quadros usados para cálculo do diâmetro da gota, velocidade final e energia cinética .....	98
9.3	Ensaio de solo.....	100

## 1 INTRODUÇÃO

A água é uma substância essencial para sobrevivência e manutenção da vida dos seres vivos. Por isso ela é assunto frequente nas campanhas ambientais, reportagens e estudos científicos. A água faz parte de quase todos os processos de produção que conhecemos e o ser humano é incapaz de viver sem ela.

Com o crescimento da população mundial nas últimas décadas a demanda por água vem aumentando consideravelmente nos processos industriais, construção civil, agricultura, produção de energia elétrica, abastecimento humano, entre outros (EGITO, 2008). Esse aumento da população mundial associado ao desmatamento das matas ciliares, crescimento do sistema agropecuário e o avanço das cidades sobre a zona rural tem levado a escassez desse recurso natural.

O desenvolvimento das cidades e sua consequente urbanização geraram impactos sobre a qualidade de vida da população. Um desses impactos é a deficiência na drenagem urbana, em consequência da impermeabilização do solo por meio de construções, tais como calçadas de concreto, cobertura asfáltica, edificações, entre outros.

O resultado da ação do homem tem sido o aumento no número de enchentes, inundações, veiculação de doenças, escassez hídrica, poluição e assoreamento dos corpos hídricos.

As soluções encontradas para este problema tem sido a construção de grandes redes de drenagem, que apenas transferem a inundação de um ponto para outro a jusante na bacia (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000), baseada nos sistemas de drenagens convencionais. Em meio a isso, existe novos conceitos em drenagem urbana que procuram resgatar as condições de pré-urbanização usando dispositivos que permitam acréscimo na infiltração e aumento do tempo de retardamento do escoamento superficial (VIRGILIIS, 2009), também chamada de drenagem alternativa, sustentável ou compensatória.

Para atenuar os efeitos gerados pela impermeabilização dos solos podem ser usadas superfícies permeáveis. Estas superfícies são capazes de manter a ligação entre a camada superficial do solo e as camadas subjacentes, diminuindo o escoamento superficial, promovendo a infiltração das águas e colaborando para melhoria na recarga dos aquíferos (CARVALHO, 2015).

Estudos controlados que permitam quantificar a infiltração e o escoamento superficial em superfícies permeáveis são de grande importância na tomada de decisão

pelo gestor público na hora da escolha da melhor alternativa para uso na drenagem urbana. Nesse contexto, existem os simuladores de chuva que são capazes de gerar precipitações semelhantes às precipitações reais, o que faz com que o estudo seja feito de forma mais rápida e simples, pois não depende de chuvas naturais. Além disso, permite a realização de simulações de chuvas em diferentes superfícies de cobertura.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como proposta simular chuvas sobre três tipos de superfícies permeáveis para estudo do processo de infiltração em superfícies permeáveis a partir de um simulador de chuva por aspersão.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Confeccionar um simulador de chuvas.
- Calibrar o simulador de chuvas analisando as seguintes variáveis: uniformidade de aplicação, intensidade real, diâmetro da gota e energia cinética da chuva produzida.
- Aplicar precipitações sobre as superfícies permeáveis: solo exposto, blocos maciços de concreto convencional (BM) e blocos de concreto poroso (BCP).
- Encontrar as taxas de infiltração estável (TIEs) para as três superfícies propostas.

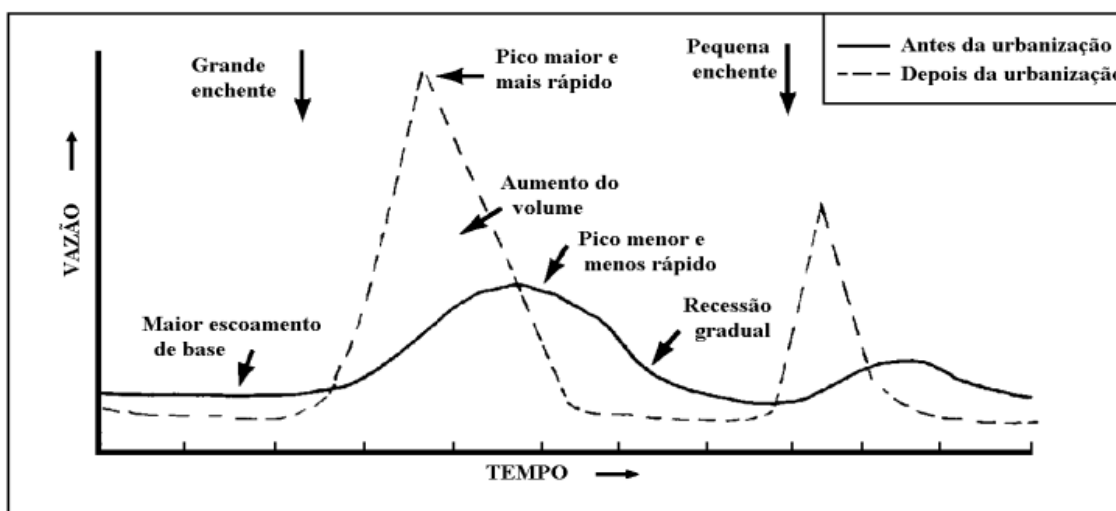
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Problemática

Na atualidade, um dos principais problemas de recursos hídricos no Brasil é o impacto decorrente do desenvolvimento urbano, tanto no âmbito interno dos municípios como no externo, exportando poluição e inundações para jusante dos corpos hídricos (TUCCI, 2002a).

O desenvolvimento urbano convencional altera o ciclo hidrológico natural através da criação de superfícies duras (por exemplo, telhados e pavimentos) que impedem que a água da precipitação infiltre-se no solo. Em particular, a urbanização aumenta a porção da precipitação anual que se torna escoamento superficial (figura 1) e diminui as porções que se infiltram e/ou evaporam (YOUNG; VAN SETERS; GRAHAM, 2013).

Figura 1. Comportamento do escoamento antes e depois da urbanização.



Fonte: Schueler (1987) apud Tucci (2002b).

Nas cidades, ocorrem desde modificações do relevo (pelo escoamento superficial e outras mudanças hidrológicas) até sedimentação de canais e reservatórios, além da destruição de itens de infraestrutura, tais como ruas, linhas de energia e dutos (ROTTA; ZUQUETTE, 2014). Enquanto isso, o lixo entope os bueiros, canais e tubulações que conduzem as águas pluviais para o corpo hídrico, alagando áreas que normalmente não eram invadidas pelas águas (KOBAYAMA et al., 2006).

Os recursos hídricos em regiões densamente ocupadas estão se aproximando ou excedendo aos limites de uso sustentável. O esgotamento das águas subterrâneas e o aumento dos eventos de inundação podem ser frequentemente observados. É necessário melhorar os sistemas de gestão da água para se reduzir as catástrofes hidrometeorológicas



e preservar os recursos naturais, em especial a água (SARASWAT; KUMAR; MISHRA, 2016). O aproveitamento de águas pluviais é uma alternativa para se minimizar os efeitos da escassez hídrica nos grandes centros urbanos e também dos custos, gerados pelo consumo da água obtida a partir de fontes tradicionais (MIERZWA et al., 2007).

### **3.2 Drenagem urbana**

Segundo Tucci (2003) os sistemas de drenagens são divididos em: na fonte, microdrenagem e macrodrenagem. A drenagem na fonte é característica de escoamentos que ocorrem no lote, sendo este um condomínio, empreendimentos individualizados, estacionamentos, área comercial, parques e passeios. Enquanto a microdrenagem é aquela que ocorre pelo sistema de condutos pluviais, canais a nível de loteamento e rede primária urbana. Já a macrodrenagem envolve os sistemas coletores de diferentes sistemas de microdrenagem.

A partir da década de 60 passou-se, em alguns países, a questionar a drenagem urbana realizada de forma tradicional, cujas obras eram destinadas a retirar rapidamente as águas acumuladas em áreas importantes, e transferir o problema para áreas a jusante (POMPÊO, 2000). É proeminente a necessidade de refletir sobre a urbanização dos espaços e a quantidade e qualidade dos recursos hídricos disponíveis (NETO, 2012).

### **3.3 Drenagem urbana sustentável**

Com o questionamento da verdade absoluta dos sistemas de drenagem tradicionais, surgiram novos conceitos dentro da drenagem urbana, baseados em conceitos sustentáveis, compensatórios e corretivos, com diferentes nomenclaturas.

O desenvolvimento inicial ocorreu nos EUA na década de 1970 com o nome de Melhores Práticas de Gestão (Best Management Practices - BMPs) e, em seguida, na década de 1980 na Europa, com o nome de Sistemas de Drenagem Sustentável (Sustainable Drainage Systems - SuDS). No início de 1990, o conceito foi introduzido na Austrália com o nome de Projeto Urbano Sensível à Água “Water Sensitive Urban Design – WSUD” (CASTRO-FRESNO et al., 2013). Na década 1990 no Condado George's County, no estado americano de Maryland, surgiu uma alternativa às BMPs tradicionais, era o Desenvolvimento de Baixo Impacto “Low Impact Development – LID” (COFFMAN, 2000). Na Nova Zelândia são chamados de Projeto Urbano de Baixo Impacto e Desenvolvimento “Low Impact Urban Design e Development – LIUDD” (ELLIOTT; TROWSDALE, 2007). Ainda nos anos 90, surge na Flórida –EUA o termo

Infraestrutura Verde “Green Infrastructure – GI” (JAYASOORIYA; NG, 2014; BENEDICT; MCMAHON, 2000). Todos estes termos se referem a alternativas aos métodos convencionais de drenagem urbana.

A utilização de SuDS para gerir o escoamento urbano e contribuir para a melhoria ambiental e paisagística é de conhecimento amplo, mas a sua aplicação ainda é limitada em muitas regiões (MORALES-TORRES et al., 2016).

A aplicação delas melhora a qualidade da água, reduz a quantidade de água que escoam superficialmente, ajuda a preservar a biodiversidade e também pode mitigar e adaptar-se às mudanças climáticas (WARWICK; CHARLESWORTH, 2012; CHARLESWORTH; WARWICK; LASHFORD, 2016).

Exemplos de SuDS são as trincheiras de infiltração, filtros drenantes, pavimentos permeáveis, bacias de retenção das águas pluviais e “wetlands” (zonas úmidas). Outras opções de SuDS que também podem ser usadas para auxiliar o controle de escoamento de águas pluviais incluem o reuso, coletor de água do telhado e telhado verde (HENNELLY, 2005).

Um dos benefícios do pavimento permeável e outras técnicas SuDS está relacionado com a quantidade de água que será armazenada durante e liberada após uma forte chuva. Isto é um dos pontos-chave dos sistemas de drenagem sustentável (ALSUBIH et al., 2013).

### **3.3.1 Pavimentos permeáveis**

A ausência de áreas permeáveis colabora para o aumento dos picos de descarga pluviais nos corpos hídricos (PEREIRA; BARBOSA, 2015). Atividades de controle na fonte do escoamento, a exemplo do uso de áreas de infiltração, são apresentadas como soluções modernas e sustentáveis no âmbito da drenagem urbana e aumentam a recarga de aquíferos mantendo o escoamento subsuperficial dos rios (ALVES SOBRINHO, 2015).

Com o intuito de minimizar os efeitos gerados pela impermeabilização dos solos podem ser usadas superfícies permeáveis, a exemplo dos pavimentos permeáveis. Existem vários tipos deles, tais como, blocos de concreto, blocos vazados, concreto permeável ou poroso, asfalto poroso e blocos de calçada (CARVALHO, 2015).

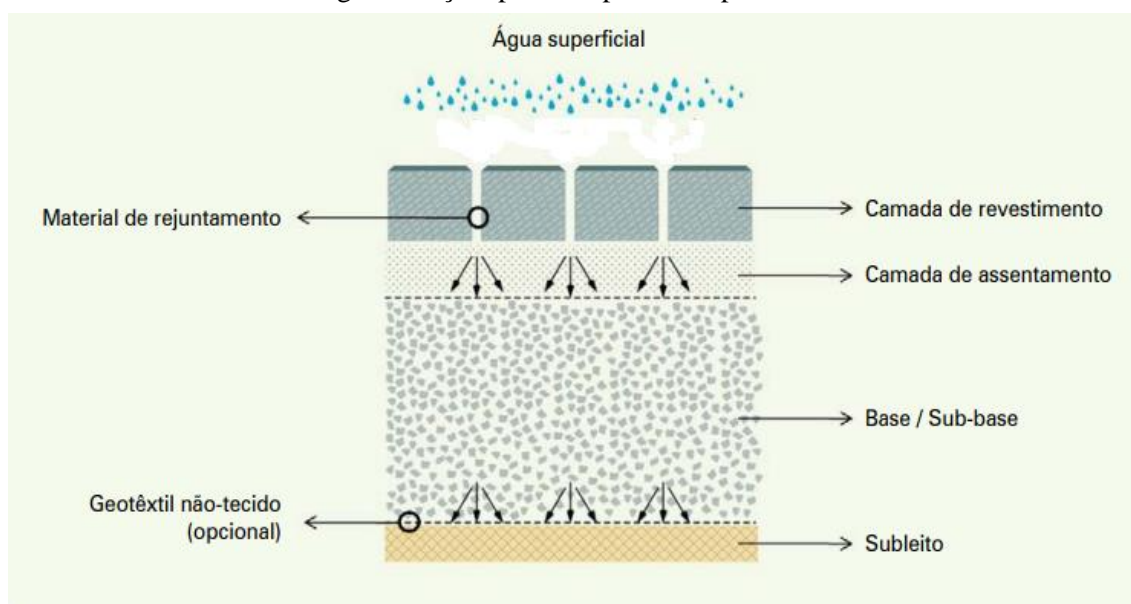
Os pavimentos porosos (asfalto poroso e concreto poroso ou permeável) são um tipo particular de pavimento que permite a passagem da água de chuva e de degelo através de sua própria estrutura, reduzindo assim enxurradas na área de implantação e áreas

circundantes (EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1999).

O concreto poroso é usado como o material para estrutura de drenagem em estradas, edifícios, e instalações de água, devido à sua excelente permeabilidade. O concreto poroso, também conhecido como concreto permeável, é uma mistura de cimento Portland, agregado graúdo e água com ou sem uma pequena quantidade de agregado fino (CUI et al., 2015). Também pode apresentar aditivos químicos e/ou materiais cimentícios suplementares (IBRAHIM et al., 2014). Nesse tipo de concreto, o agregado graúdo em contato com a pasta cimentícia cria os vazios interligados que permitirão a passagem da água (KEVERN, 2015). Esse concreto é uma alternativa sustentável aos outros tipos de pavimentação, pois facilita a infiltração de água mantendo seu desempenho estrutural (TORRES; HU; RAMOS, 2015).

A simples adoção de pavimentos como superfícies permeáveis por si só não representa ganho significativo para os sistemas de drenagem. Entretanto, sua combinação com a adoção de uma estrutura de pavimento porosa na base e sub-base como, por exemplo, com o emprego de brita graduada simples de graduação aberta permitirá acúmulo ou armazenamento temporário das águas pluviais em seu interior (VIRGILIS, 2009). A seção tipo ou camadas que compõem o pavimento permeável (figura 2) consiste no revestimento, camada de assentamento, base e sub-base, tubulação de drenagem, geotêxtil e subleito (MARCHIONI; SILVA, 2010).

Figura 2. Seção tipo de um pavimento permeável.



Fonte: Marchioni e Silva (2010).

Existe a probabilidade que o uso desse concreto, elimine a carência de grandes obras de drenagem, pelo fato de sua grande capacidade de infiltração, quando assentado sobre base e sub-base permeáveis, que funcionam como um reservatório de água infiltrada. Este tipo de bloco, quando instalado sobre uma camada de 150 mm de seixo ou brita graduada, tem a capacidade de estocagem aumentada em 75 mm de precipitação (HÖLTZ, 2011). A taxa de infiltração neste tipo de concreto pode chegar alcançar 8600 mm/h, o que equivale a mais de 100 vezes a taxas de infiltração de solos naturais e da areia saturada (LEMING; MALCOM; TENNIS, 2007).

Esse concreto apresenta diversas vantagens e usos, ajuda na manutenção da área útil do terreno, reduzem a erosão, melhoram a qualidade da água absorvida, absorve menos radiação solar e facilita a sobrevivência da arborização sem auxílio de irrigação.

Sua aplicação é recomendada para as calçadas, revestimento de faixas de ciclismo, quadras de esporte, áreas para animais em zoológicos, ruas residenciais (boa resistência a derrapagem), ao redor de piscinas, e ambientes que buscam melhorar o isolamento acústico.

### **3.4 Precipitação**

A água apresenta um papel importantíssimo no meio urbano, havendo necessidade de atendimento à demandas diferenciadas, questões relativas à sua qualidade, disponibilidade e ao escoamento de águas da chuva (POMPÊO, 2000).

Nos estudos hidrológicos nos países tropicais, a chuva é o tipo de precipitação mais importante, devido à sua capacidade em produzir erosão do solo em consequência do impacto das gotas no solo e ao escoamento superficial (ALVES SOBRINHO; FERREIRA; PRUSKI, 2002).

As chuvas constituem-se na principal fonte de água para bacias hidrográficas, por isso são indispensáveis para o dimensionamento de projetos hidráulicos. Para caracterizar a precipitação, é necessário saber a sua duração, intensidade e frequência de ocorrência (CAMPOS et al., 2017).

Nas áreas urbanas a presença de superfícies impermeáveis, tais como telhados, passeios, ruas, estacionamentos alteram características de ciclo hidrológico. (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000). Isso tem levado ao aumento das enchentes urbanas e degradação da qualidade das águas pluviais.

O monitoramento contínuo do comportamento hidrológico em áreas experimentais, em diferentes escalas, é uma opção para a compreensão de alguns

fenômenos hidrológicos, assim como também é útil para obtenção de dados para análises (SANTOS, 2009).

### **3.5 Infiltração**

A infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo, sendo um dos mais importantes processos que compõem o ciclo hidrológico, por ser fator determinante na disponibilidade de água para as culturas, na recarga dos aquíferos subterrâneos, na ocorrência e magnitude do escoamento superficial e no manejo e conservação do solo e da água (OLIVEIRA, 2005).

Essa entrada de água no solo decresce com o tempo, sendo dependente do umedecimento do perfil, e assume um valor constante denominada velocidade de infiltração básica (VIB) (POTT; DE MARIA, 2003). Esse valor constante, também conhecido taxa de infiltração estável (TIE), é um importante atributo para a elaboração de projetos de irrigação, de drenagem, conservação do solo e manejo da irrigação (PANACHUKI, 2003).

Iniciada uma precipitação pluviométrica, se o solo se encontra em condições adequadas de permeabilidade, parte dessa precipitação infiltra nas camadas superficiais e move-se em direção aos aquíferos, a outra parte escoar rumo ao corpo d'água mais próximo. Porém, esse processo pode ser afetado quando o solo perde sua capacidade de infiltração, tornando-se impermeável. Quando isso ocorre, há um aumento no volume e velocidade de escoamento das águas pluviais durante a precipitação (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000).

Em projetos de irrigação por aspersão, por exemplo, a quantificação da velocidade de infiltração da água no solo, tem como foco encontrar a taxa máxima de aplicação de água dos aspersores que serão usados em campo, para evitar perdas por escoamento superficial (COELHO; MIRANDA; DUARTE, 2000).

Alguns fatores que afetam a velocidade de infiltração são a umidade inicial, condições da superfície do solo, condutividade hidráulica saturada, distribuição de tamanho e volume de poros, presença de horizontes estratificados, distância entre a fonte de suprimento de água e a frente de umedecimento, textura e tipo de argila (PAIXÃO et al., 2009). A taxa de infiltração de água no solo é influenciada pela permeabilidade, que é controlada pelos poros maiores onde a água não sofre a influência da força da capilaridade. Logo, a conectividade da rede de macro poros é um fator importante, que

maximiza o volume total infiltrado e a velocidade de infiltração (ALVES SOBRINHO, 2015).

A taxa de infiltração de água no solo tem que ser quantificada por métodos simples e capazes de representar, adequadamente, as condições naturais em que se encontra o solo. Neste sentido, torna-se necessário adotar métodos e modelos cujas determinações baseiam-se em condições iguais às observadas em campo (PAIXÃO et al., 2009).

Os métodos que não consideram o impacto da gota da chuva no solo, por exemplo, podem superestimar a infiltração da água, gerando problemas no dimensionamento de projetos conservacionistas, causando problemas de erosão do solo (PANACHUKI et al., 2006).

A determinação *in situ* dos parâmetros de um modelo de infiltração, pode ser executada através de dois tipos de medições: global, que requer a utilização de instrumentos espacialmente distribuídos em toda bacia; e a pontual, que é feita em áreas específicas. Entre as pontuais mais frequentemente usadas temos o infiltrômetro de duplo anel ou infiltrômetro de anéis concêntricos e os simuladores de chuvas (WEBER; PAOLI; APESTEGUI, 2010).

O processo de infiltração de água no solo pode ser descrito por diversas equações ou modelos, alguns desenvolvidos a partir de considerações físicas (modelos teóricos ou conceituais), enquanto outros são de forma empírica (DALRI et al., 2010).

Os modelos empíricos foram criados através de experimentação e não consideram, diretamente no seu desenvolvimento, leis físicas (CARVALHO; GITIRANA JUNIOR; CARVALHO, 2012). Dentre os modelos empíricos vale destacar os de Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton e Holton (BRANDÃO; PRUSKI; SILVA, 2003).

Já os teóricos são desenvolvidos a partir de equações que se baseiam nos processos físicos do escoamento da água em meios porosos. Os principais modelos físicos gerais para esse tipo de escoamento são as Equações de Richards e a Lei de Darcy (CARVALHO; GITIRANA JUNIOR; CARVALHO, 2012). Entre os teóricos os mais conhecidos são Green Ampt, Green Ampt Modificado por Mein e Larson, Philip e Morel-Seytoux e Khanji (BRANDÃO; PRUSKI; SILVA, 2003).

### **3.6 Simuladores de chuva**

A execução de experimentos em bacias de tamanho real, embora forneçam informações exatas das variáveis intervenientes (declividade, área, intensidade de

precipitação, entre outros), não permite o controle das mesmas e, portanto, não se tem repetitividade das informações (REIS, 2015).

Nos EUA, na década de 1930, Borst e WoodBurn construíram um simulador de chuva para estudos do comportamento do escoamento superficial da água. Depois disso, um grande número de simuladores de chuva foi desenvolvido para controlar e reproduzir as características de uma chuva natural (SANTOS, 2015).

Os simuladores de chuva são instrumentos de pesquisa projetados para a aplicação de água de forma similar às chuvas naturais (CARVALHO et al., 2012a). Eles são projetados para aplicarem quantidade e taxa de água controladas em uma área ou parcela conhecida (PAIGE et al., 2003).

A grande vantagem do uso dos simuladores de chuva está no controle que se pode ter sobre as características da chuva, como o diâmetro médio das gotas, a velocidade terminal das gotas, a energia cinética, a distribuição uniforme da precipitação sobre a parcela experimental (ANDERSEN; FOSTER; PRATT, 1999; SPOHR et al., 2015), o tempo de duração e a intensidade da chuva simulada (RIBEIRO et al., 2007).

A utilização de simuladores de chuva em processos investigativos em laboratório é fundamental para a compreensão dos processos hidrológicos decorrentes de chuvas naturais, possibilitando o detalhamento e a reprodução de forma controlada de eventos complexos (ABRANTES; LIMA; MONTENEGRO, 2015; CHOUKSEY et al., 2017). As simulações de chuva ajudam a entender os efeitos da precipitação sob várias condições (COVERT; JORDAN, 2009).

Eles são úteis para obter dados de erosão, infiltração, escoamento superficial e transporte de sedimentos e nutrientes (BENITO et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2013). Uma alternativa para reduzir custo e tempo é a utilização de simulações (MENEZES et al., 2015) e comparar a eficiência de sistemas distintos.

### ***3.6.1 Tipos de simuladores***

O estudo da infiltração pelo processo de simulação de chuva elimina as limitações das medições de quando se usa infiltrômetros de anel duplo, uma vez que esses não simulam uma chuva sobre a área de estudo e geralmente alteram a superfície do solo, devido à sua instalação (WEBER, 2015). Os simuladores são eficientes nos quesitos tempo e custo, o que permite superar a dependência por eventos de precipitação natural (HERNGREN; GOONETILLEKE; AYOKO, 2004).

Existem dois grandes grupos de simuladores com base no mecanismo gerador de gotas: os que usam o método de gotejamento e os que utilizam a metodologia de bicos aspersores para produção de chuva, chamados também de infiltrômetros por aspersão.

### *3.6.1.1 Gotejamento*

Nos simuladores por gotejamento a formação de diferentes tamanhos de gotas é definida a partir de um dispositivo gerador de gotas (agulha hipodérmica, tubos perfurados, tubos capilares) e de frequência constante, com altura de queda variada (CARVALHO, 2006). A intensidade de precipitação nesses simuladores aumenta linearmente com o aumento da coluna de água no reservatório formador de gotas (RIBEIRO, 2006).

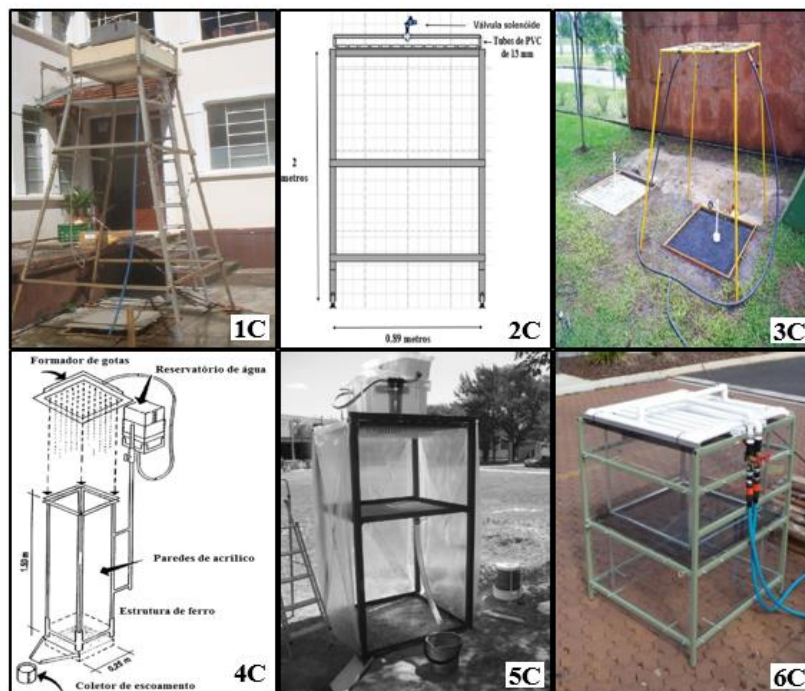
A desvantagem desses simuladores é que a velocidade inicial da gota é zero (BENITO et al., 2001), o que impede que as gotas produzidas apresentem velocidade terminal e energia cinética próximas ao de uma chuva natural. Outra desvantagem é que a gota produzida atinge a superfície sempre num mesmo lugar pelo fato de o reservatório formador de gotas e as agulhas estarem fixas, o que não acontece numa chuva comum (KINNER; MOODY, 2008).

Encontra-se simuladores por gotejamento desenvolvidos para diversos casos: estudos de infiltração em solo (COMMANDEUR, 1992; AOKI; SERENO, 2006; RIBEIRO et al., 2007) e em pavimentos (ANDERSEN; FOSTER; PRATT, 1999; NICHOLS; LUCKE; DIERKES, 2014; WEBER, 2015), escoamento superficial (ALESSI; KOKOT; GOMES, 2006), erosão (COMMANDEUR, 1992; NAMPULÁ et al., 2016), mobilidade de substâncias em solos (FERNÁNDEZ-GÁLVEZ; BARAHONA; MINGORANCE, 2008), estabilidade dos agregados em solos (CARVALHO, 2006), encrostamento e contaminação ambiental (RIBEIRO et al., 2007).

Alguns dos simuladores citados podem ser vistos na figura 3.



Figura 3. Simuladores por gotejamento.



Fonte: 1C: Carvalho (2006). 2C: Nampulá et al. (2016). 3C: Alessi, Kokot e Gomes (2006). 4C: Aoki e Sereno (2006). 5C: Weber (2015). 6C: Nichols, Lucke e Dierkes (2014).

### 3.6.1.2 Aspersão

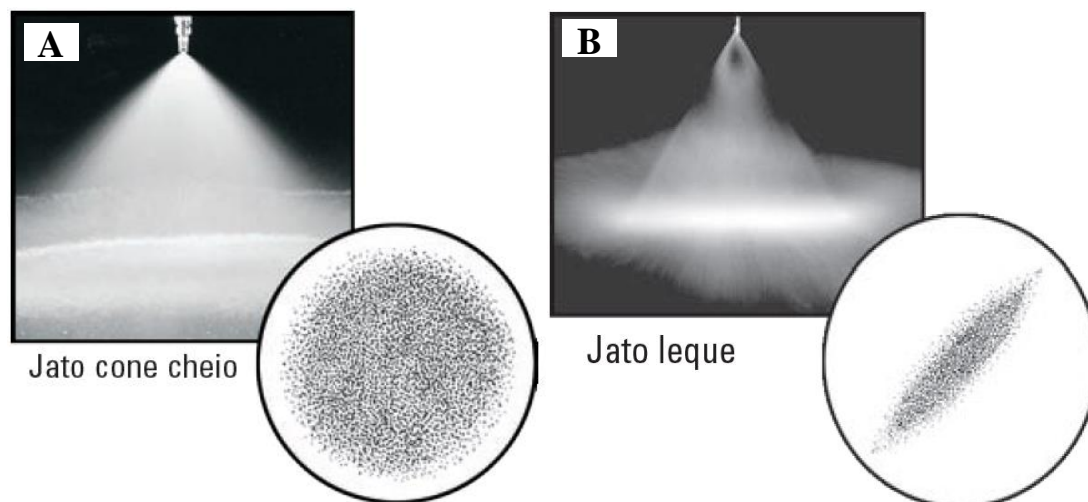
Nos simuladores por aspersão a precipitação se forma pelo fracionamento do jato d'água em gotas, que se dá pela passagem da água pressurizada em pequenos orifícios dos bicos ou bocais (MONTEBELLER et al., 2001). Esses equipamentos permitem produzir a velocidade de impacto das gotas numa dada superfície similar à velocidade terminal das gotas de uma chuva natural, regulando-se a pressão do sistema (ALVES SOBRINHO; FERREIRA; PRUSKI, 2002). Sua principal vantagem é que dependendo do bico aspersor, da pressão de saída de água e da altura do bico, é possível obter precipitação de diferentes intensidades e energias cinéticas (BENITO et al., 2001). Com esses simuladores é possível gerar chuvas com intensidades maiores que aquelas geradas pelos simuladores por gotejamento (COVERT; JORDAN, 2009).

A desvantagem dos simuladores com bicos aspersores é o diâmetro das gotas, que para altas pressões e, conseqüente, altas intensidades, não se aproxima do real (SANTOS, 2006). Além disso, apresentam uma maior complexidade na montagem e consumo de água que aqueles que usam o método de gotejamento (BENITO et al., 2001).

Os bicos utilizados para os simuladores por aspersão em sua maioria são fornecidos pela Spraying Systems Company. No levantamento bibliográfico realizado, a maioria das pesquisas empregam os bicos aspersores de jato cone cheio (linha FullJet) ou

jato leque (linha VeeJet) apresentados na figura 4. Os bicos de jato cone cheio formam um padrão de pulverização cheio, circular, uniforme e com gotas de tamanhos médio a grande. Os de jato leque formam um padrão de pulverização fino, elíptico, uniforme e com gotas de tamanhos pequeno a médio.

Figura 4. Exemplos de jato cone cheio (A) e jato leque (B).



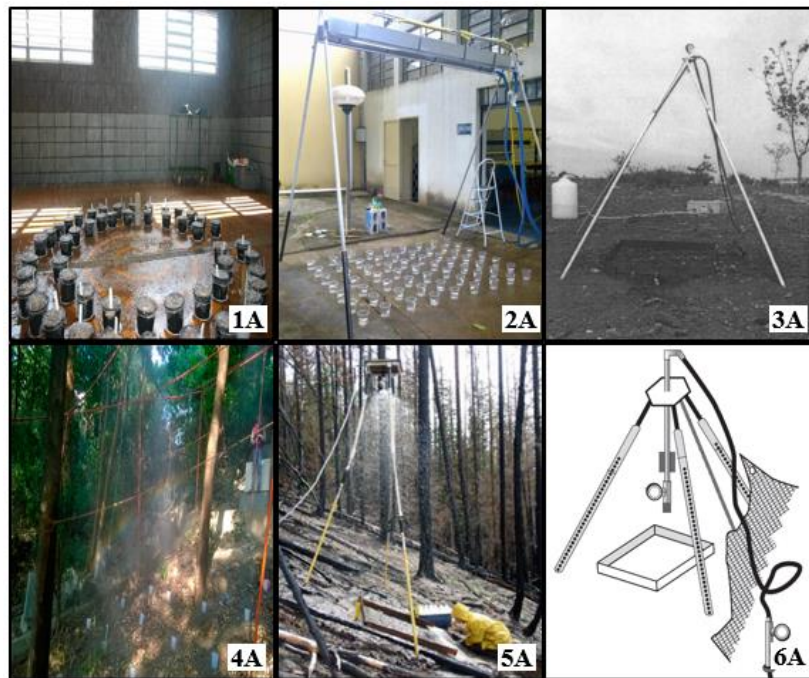
Fonte: Spraying Systems Company (2016).

Simuladores com bicos FullJet foram usados em estudos de erosão (BENITO et al., 2001; COVERT; JORDAN, 2009), infiltração (KINNER; MOODY, 2008), escoamento (COVERT; JORDAN, 2009; ABRANTES; LIMA; MONTENEGRO, 2015), calibração de chuva artificial (PÉREZ-LATORRE; DE CASTRO; DELGADO, 2010; SANTOS, 2015), lixiviação (ALVES, 2010), ambientais (JÚNIOR; SIQUEIRA, 2011; REIS, 2015), encostas (COVERT; JORDAN, 2009; CHOUKSEY et al., 2017).

Já os bicos VeeJet tiveram sua aplicação em estudos de manejo do solo (SOUZA, 1985), erosão (ALBUQUERQUE; CASSOL; REINERT, 2000; LOCH et al., 2001; PAIGE et al., 2003; BERTOL; BERTOL; BARBOSA, 2012; CARVALHO et al., 2012a; LIMA, 2013; SANTANA et al., 2015), escoamento (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; PAIGE et al., 2003), calibração de chuva artificial (MONTEBELLER et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2013), infiltração (LOCH et al., 2001; ALVES SOBRINHO, 2015), contaminação (HERNGREN; GOONETILLEKE; AYOKO, 2004) e estudos ambientais (SPOHR et al., 2015; SANTOS, 2016).

Nas figuras 5 e 6 são apresentados simuladores por aspersão usados por diversos autores.

Figura 5. Simuladores com bicos FullJet.



Fonte: 1A: Alves (2010). 2A: Abrantes, Lima e Montenegro (2015). 3A: Benito et al. (2001). 4A: Chouksey et al. (2017). 5A: Covert e Jordan (2009). 6A: Kinner e Moody (2008).

Figura 6. Simuladores com bicos VeeJet.



Fonte: 1B: Souza (1985). 2B: Bertol, Bertol e Barbosa (2012). 3B: Oliveira et al. (2013). 4B: Paige et al. (2003). 5B: Herngren, Goonetilleke e Ayoko (2004). 6B: Spohr et al. (2015).

Simuladores de chuvas devem ser projetados para atender às demandas concorrentes: replicação de chuva natural, facilidade de portabilidade, adequação a diferentes terrenos, custos aceitáveis de construção, uniformidade nas precipitações, intensidade, tamanho da gota e energia cinética (GRISMER, 2012).

Para que as superfícies permeáveis possam ser usadas em ambientes urbanos como opção para o controle do escoamento superficial, o seu comportamento precisa ser estudado (BRUNO, 2011). O uso da simulação de chuvas artificiais oferece a oportunidade de gerar uma base de dados confiável para realizar investigações científicas (HERNGREN et al., 2005).

## 4 METODOLOGIA

A metodologia será dividida em quatro fases, sendo elas: Montagem do simulador, Calibração do simulador, Execução das simulações e Análise Estatística.

### 4.1 Montagem do simulador

Para o desenvolvimento do simulador de chuvas foram definidas algumas condições que o mesmo deveria se enquadrar. Essas condições são apresentadas a seguir:

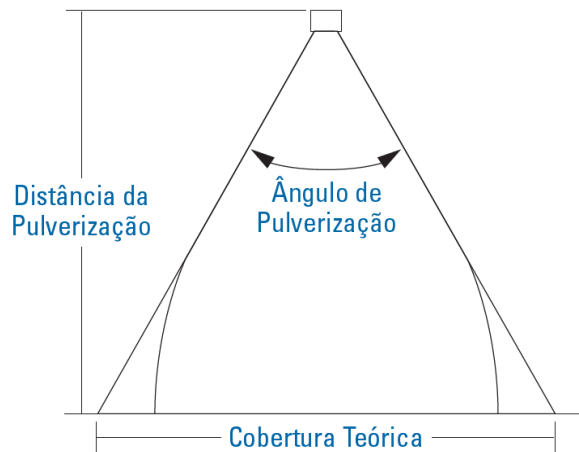
1. Ser de fácil construção, montagem e operação;
2. Ser capaz de simular chuvas numa área mínima de 1 m<sup>2</sup>;
3. Apresentar uniformidade em suas precipitações;
4. Ser capaz de simular precipitações que atingissem ou igualasse o valor máximo da intensidade estimada através da equação da chuva de Palmas – TO, levando em consideração os tempos de retorno estabelecidos para microdrenagem pelo Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas – TO (PREFEITURA MUNICIPAL DE PALMAS, 2014) e os tempos de duração escolhidos (10, 30 e 60 minutos).

A estrutura de sustentação do simulador foi construída de tubos de PVC de 40 mm e conexões (joelho 90° soldável e tê soldável). As conexões foram fixadas através de parafusos e porcas. A base do simulador é quadrada (1,49 X 1,49 m) e possui altura de 2,5 m.

Para seleção dos aspersores que foram usados no experimento, realizou-se um levantamento bibliográfico das marcas mais utilizadas em trabalhos no mundo e no Brasil no desenvolvimento de simuladores de chuva. Aspersores de uso bastante difundido tanto mundial quanto nacionalmente são os fornecidos pela Spraying System Company. Esta fabricante fornece bicos de cone cheio que permitem produzir chuvas com boa distribuição espacial ao longo da área aplicada. Levando em consideração esses fatores e a existência de representante da empresa fornecedora no Brasil, optou-se por adquirir aspersores desta.

A estrutura foi criada para cobrir uma área de no mínimo 1 m<sup>2</sup>, já que esse é o tamanho da área onde foram realizados os testes de precipitação. Essa área de cobertura está diretamente relacionada com a cobertura teórica do bico aspersor (figura 7), também chamada de raio molhado ou diâmetro molhado.

Figura 7. Cobertura teórica do jato de água produzido por um aspersor.



Fonte: Spraying Systems Company (2016).

No manual do fabricante, os ângulos de pulverização indicam coberturas aproximadas de pulverização baseado na distância entre o aspersor e o solo. As especificações são baseadas na hipótese de que o ângulo de pulverização mantém-se o mesmo ao longo de toda extensão de pulverização. O quadro 3 mostra as especificações dos bicos aspersores que foram selecionados e adquiridos da Spraying System Company.

Quadro 1. Bicos aspersores usados nos testes.

Bicos	DPL (mm)	Vazão (litros/minuto)				Ângulo de pulverização (°)		
		0,4*	0,5*	0,7*	1,5*	0,5*	1,5*	6*
1/2 G-16 - FULLJET	3,2	4,7	5,2	6,1	8,7	48	50	46
1/2 G-32 - FULLJET	3,6	9,4	10,4	12,2	17,3	72	75	68
1/2 HH-36SQ - FULLJET	3,2	10,6	11,8	13,7	19,5	78	82	75

Fonte: Spraying Systems Company (2016). \*Pressão expressa em bar. DPL: diâmetro de passagem livre.

Para pressurizar o sistema de abastecimento de água do simulador foi utilizada uma bomba submersa Anauger 800 de 380 W, já que a rede de abastecimento de água local não apresenta pressão suficiente para execução dos testes. Para a calibração do simulador usou-se água da rede da Universidade Federal do Tocantins e para as simulações de chuva foi usada a água captada no lago que está à margem da Universidade. Para evitar a presença de alguma partícula sólida durante os ensaios, utilizou-se um filtro para irrigação com tela inox 120 Mesh.

Para garantir maior praticidade e confiança na geração das chuvas simuladas optou-se pela automatização do simulador de chuvas. Para isso foi escolhida o Arduino, que é uma plataforma eletrônica de hardware livre e software de uso simplificado. As placas Arduino são capazes de ler entradas e transformá-las em uma saída, sendo ainda



possível informar a placa o que fazer, enviando um conjunto de instruções para o microcontrolador presente na placa, através da linguagem de programação Arduino (com base em Wiring) e o software Arduino (IDE), com base em Processing (ARDUINO, 2017).

Para que fosse possível fazer essa automatização do simulador foi necessário também adquirir sensores e acessórios compatíveis com o Arduino. Os sensores e acessórios são vistos no quadro 4.

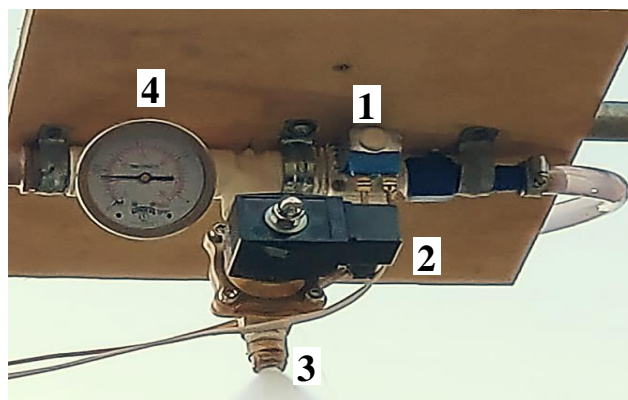
Quadro 2. Lista de materiais usados na automação do simulador de chuvas.

Tipo	Quantidade
Jumper Premium para Protoboard Macho-Macho 20 cm - Kit c/ 20 peças	1
Jumper Premium para Protoboard Macho-Fêmea 20 cm - Kit c/ 20 peças	1
Válvula solenoide para Água 12V 180° (½ x ½)	1
Válvula solenoide série 2W-1/2BSP 220VAC	1
Placa Arduino UNO R3 + Cabo USB	1
Kit Prototipagem: Base acrílica incolor 120x83mm + Protoboard 400 pontos + Parafusos para Arduino UNO - BP400	1
Módulo Relé 5V 10A 2 canais com Optoacopladores	1
Pulsador Push Button NA / Chave Botão DS-212 3A	1

Os jumpers foram usados para fazer a conexão dos sensores e acessórios com a Protoboard 400 pontos e a placa Arduino UNO R3. As válvulas solenoides tinham a função de controlar a passagem da água, através de seu fechamento ou abertura. O módulo relé era usado para controlar os dispositivos de corrente alternada de até 10 A. O botão pulsador acionava a rotina de trabalho dando início as simulações de chuva.

Na figura 8 são apresentados a válvula solenoide secundária (1) usada para o retorno de água pra caixa d'água, a válvula solenoide primária (2) que controla a passagem de água para o aspersor, o aspersor (3) preso na base da válvula principal e o manômetro (4) usado para aferir pressão.

Figura 8. Acessórios diversos.



## 4.2 Calibração do simulador

### 4.2.1 Uniformidade de aplicação dos aspersores

Para definir qual dos três aspersores adquiridos seria usado no simulador foram realizados testes de uniformidade de aplicação desses aspersores. Para verificar a distribuição espacial da chuva foram usados 25 coletores distribuídos ao longo de 1 m<sup>2</sup> conforme esquema apresentado na figura 9. O diâmetro nominal do tubo é de 75 mm, tendo diâmetro interno de 73 mm. Cada coletor possui 30 cm de altura para evitar que respingos influenciassem nos resultados.

Figura 9. Forma e coletores usados para o teste do CUC.



Sobre os coletores foi simulada uma precipitação de intensidade constante durante 3 minutos. Em cada coletor ficou armazenado determinado volume de água que era quantificado através de balança analítica. O volume quantificado foi convertido em lâmina precipitada através da equação 1.

$$X = \frac{V_p}{A_C}$$

Onde:

$X$  = lâmina precipitada em um coletor (mm);

*Equação 1*



$V_p$  = volume precipitado em um coletor (mm<sup>3</sup>);

$A_c$  = área de captação do coletor (mm<sup>2</sup>);

A uniformidade de aplicação foi avaliada usando o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen – CUC (CHRISTIANSEN, 1942), calculado através da equação 2.

$$CUC = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n \times \bar{X}}\right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$CUC$  = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (%);

$\bar{X}$  = média das lâminas precipitadas sobre os coletores (mm);

$n$  = número de coletores.

#### 4.2.2 Determinação da intensidade média e intensidade real

A intensidade média ( $Im$ ) foi obtida pela razão entre a lâminas precipitada no coletor e o tempo da simulação (equação 3). A média dessa intensidade foi calculada fazendo a média aritmética das  $Im$  dos 25 coletores usados no teste.

$$Im = \frac{X}{t} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$Im$  = intensidade média da chuva simulada (mm/h);

$t$  = tempo de duração da chuva (h).

Através dos valores da  $Im$  calculada para cada um dos vinte e cinco coletores foram gerados os gráficos da distribuição espacial da chuva em 1 m<sup>2</sup> para a pressão de trabalho e bico escolhidos para simular as chuvas. Para isso usou-se a ferramenta Plot do programa Origin.

Para determinar a vazão produzida pelo aspersor para diferentes pressões usou-se um tubo PVC de 2” que era posicionado sobre o aspersor, ligava-se a bomba e em seguida o botão do Arduino era acionado, dando início a simulação. A água era direcionada para um balde coletor e a massa era quantificada em uma balança analítica. Esse teste durou 1 minuto. Através dos dados obtidos foi gerado um gráfico com a curva característica do bico que foi escolhido para simular as chuvas.

Para determinação da intensidade real usou-se uma forma coletora com borda superior de área igual a 1 m<sup>2</sup> (figura 10). A altura entre a borda superior e o solo era de 0,3 m e era necessária para evitar que respingos influenciassem no cálculo da intensidade real. Essa forma foi centralizada tendo como base o aspersor que estava posicionado a 2,5 m acima da forma. Com o auxílio de um registro de gaveta ajustou-se a pressão que era

conferida visualmente no manômetro de glicerina. Com a pressão ajustada, dava-se início a simulação. As chuvas foram produzidas usando as pressões 0,5, 0,9 e 1,3 kfg/cm<sup>2</sup>. A duração de cada ensaio foi de 3 minutos, sendo realizadas três repetições para cada faixa de pressão. Findada a chuva, a massa de água era quantificada em balança analítica e a mesma convertida em volume através da densidade da água (considerou o valor de 1 g/cm<sup>3</sup>).

Figura 10. Forma coletora de chuva para o teste de intensidade.



A intensidade real da precipitação foi determinada através da equação 4.

$$I_r = \left[ \frac{\left( \frac{V_c}{S} \right)}{t} \right] \times 60 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$I_r$  = intensidade real (mm/h);

$V_c$  = volume coletado (L);

$S$  = área da caixa coletora (m<sup>2</sup>);

$t$  = tempo de duração da chuva (min).

Foi realizada uma comparação entre os valores das  $I_m$  e  $I_r$  encontrados e a tabela com esses dados é apresentada nos resultados e discussões.

Para determinar as intensidades das chuvas em Palmas – TO, utilizou-se a equação de intensidade-duração-frequência (equação i-d-f) também conhecida como equação da chuva para a cidade (equação 5) proposta no Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas – TO (PREFEITURA MUNICIPAL DE PALMAS, 2014).

$$i = \frac{749,97 \times T_r^{0,104}}{(t_d + 9)^{0,702}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$i$  = intensidade de precipitação (mm/h);

$Tr$  = tempo de retorno adotado (anos);

$t_d$  = tempo de duração da chuva de projeto (minutos).

Segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas – TO (PREFEITURA MUNICIPAL DE PALMAS, 2014) as obras de microdrenagem devem ser dimensionadas para período de retorno de 2 a 10 anos para inconvenientes que advêm das inundações e das enxurradas.

#### **4.2.3 Calibração da intensidade da chuva utilizando a válvula solenoide**

Com a pressão de trabalho e bico já definido o objetivo deste ensaio foi verificar o comportamento da intensidade real gerada em função do tempo de abertura (TA) e do tempo de fechamento (TF) da válvula solenoide. Para calibração foram selecionados uma gama de tempos de abertura e fechamento. Os dados obtidos foram ajustados ao modelo polinomial proposto por Sousa Júnior (2011) que verificou após testar diversas funções que este modelo não linear era o mais adequado para estudos com válvula solenoide. Para fazer o ajuste dos dados ao modelo e determinar o coeficiente de determinação usou-se o programa Origin.

#### **4.2.4 Determinação do diâmetro da gota e da energia cinética**

Para determinar o diâmetro das gotas optou-se pelo método da farinha, usado pela primeira vez por Laws (1941). Este ensaio aconteceu no Laboratório de Geologia e Geomorfologia pertencente à Universidade Federal do Tocantins. O ensaio foi executado apenas para pressão de trabalho e bico escolhidos com base no melhor CUC. Uma forma (figura 11) com área interna de 1 m<sup>2</sup> e altura interna de 2,5 cm foi usada neste método.

Figura 11. Forma coletora de gotas usada no método da farinha (1), peneiramento da farinha de trigo sobre a lona plástica colocada sobre a forma (2) e forma preenchida com farinha de trigo (3).



Inicialmente, foi colocada uma lona plástica sobre a forma para facilitar a retirada da farinha após o ensaio e em seguida, peneirou-se a farinha de trigo na peneira de 0,450 mm formando uma camada uniforme até o nível da borda superior da forma visando-se evitar possíveis compactações. Feito esse processo, o simulador foi ligado, a pressão foi ajustada e a forma centralizada tendo como base o aspersor. A válvula solenoide foi acionada através do Arduino e abriu durante 1 segundo permitindo que as gotas de chuva caíssem sobre a farinha de trigo. Após a simulação, uma fina camada de farinha foi peneirada sobre a forma para evitar que as gotas de água formadas evaporassem. As gotas passaram por secagem ao ar livre durante 24 horas dentro da forma. Terminado esse prazo a farinha foi colocada na estufa à 105°C para secagem pelo período de 24 horas. Os grânulos formados e secos na estufa passaram pelo processo de separação utilizando as peneiras 0,425; 0,850; 1,00; 1,08; 1,40; 1,70; 2,00; 2,36; 3,35; 4,00 mm.

Para as peneiras que tinham mais de 50 grânulos, pegou-se uma amostra de 50 unidades para calcular a massa média do grânulo retido em cada peneira. Esses grânulos foram pesados para a obtenção da massa total e da massa média.

Os diâmetros médios das gotas foram determinados com base na massa média dos grânulos, conforme equação 6 proposta por Sousa Júnior (2011).

$$d = \sqrt[3]{\frac{6 \times M_g}{\pi \times \rho}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$d$  = diâmetro da gota (mm);

$M_g$  = massa média de um grânulo (mg);

$\rho$  = massa específica da água (mg/mm<sup>3</sup>);

$\pi$  = constante Pi (aproximadamente 3,14).

O volume de cada gota foi calculado pela equação 7, sendo o volume de água por peneira calculado multiplicando-se o número de gotas pelo volume de gota relativo a cada peneira.

$$V = \frac{\pi \times d^3}{6} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$V$  = volume da gota (mm<sup>3</sup>);

Através dos resultados de diâmetro da gota e volume acumulado foi traçada a curva de distribuição do tamanho das gotas, que permite determinar o diâmetro médio das

gotas (D50) também chamado de diâmetro mediano volumétrico das gotas, que é o diâmetro correspondente ao volume acumulado de 50%. Essa curva é apresentada nos resultados e discussões.

Na determinação da velocidade terminal das gotas usou-se equação 8 proposta por Beard e Pruppacher (1969) e Beard (1976) apud Van Dijk, Bruijnzeel e Rosewell, (2002).

$$V_t = 0,0561 \times d^3 - 0,912 \times d^2 + 3,25 \times d - 0,254 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$V_t$  = velocidade terminal da gota (m/s);

$d$  = diâmetro da gota (m);

A energia cinética de impacto de uma gota ( $KE_n$ ) é determinada pela lei universal da energia (equação 9), desprezando-se as forças contrárias envolvidas em um sistema.

$$KE_n = 10^{-3} \times \frac{M_g \times V_t^2}{2} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$KE_n$  = energia cinética de uma gota de diâmetro  $d$  (J);

$M_g$  = massa média de um grânulo (g);

A energia específica no tempo ou taxa de tempo “instantânea” de energia cinética da chuva em uma superfície de  $1\text{m}^2$  foi calculada através da equação 10 (BRODIE; ROSEWELL, 2007). A energia específica no volume ou energia cinética “contida” em  $1\text{m}^2$  de superfície de área por unidade de altura de chuva foi obtida pela equação 11 (HUDSON, 1965).

$$KE_i = \sum_{i=1}^n N_{An} \times KE_n \quad \text{Equação 10}$$

Sendo:

$N_{An}$  = número de gotas (de cada classe de diâmetro) por segundo que atinge uma superfície de  $1\text{m}^2$ ;

$KE_i$  = energia específica no tempo ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ ).

$$KE_p = \frac{3600 \times KE_i}{I} \quad \text{Equação 11}$$

$KE_p$  = energia específica no volume ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{mm}$ ).

$I$  = intensidade de chuva ( $\text{mm}/\text{h}$ ).



## 4.3 Execução das simulações

### 4.3.1 Localização

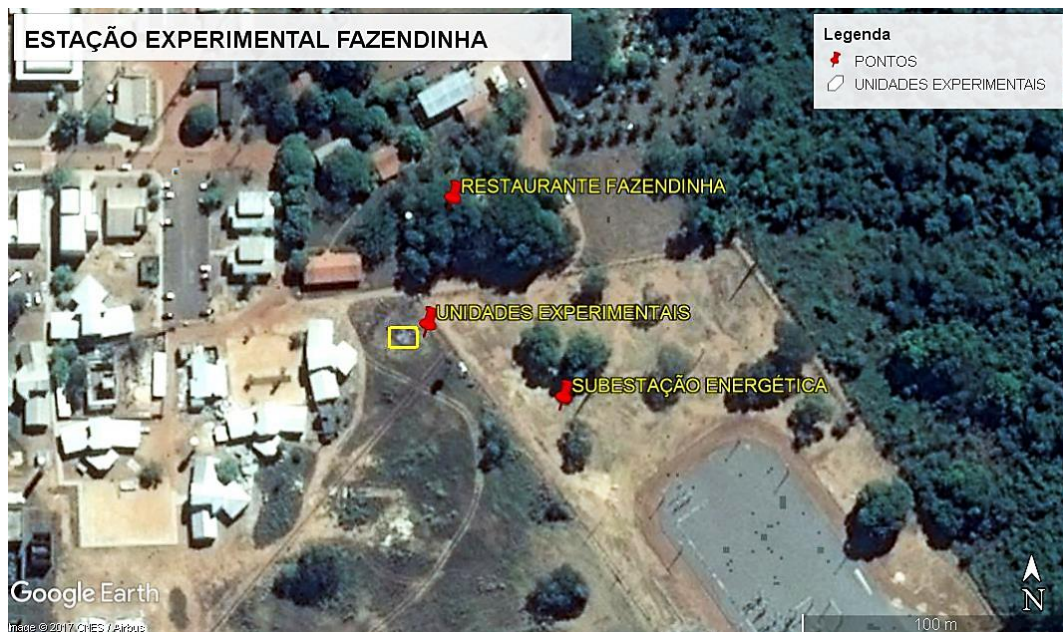
Para as simulações de chuva foram escolhidas duas das três unidades montadas em 2014 no Trabalho de Conclusão de Curso sob título “Pavimentos permeáveis para drenagem de água e diminuição do escoamento superficial” (CASTRO, 2015). As unidades escolhidas foram as construídas com blocos de concreto poroso (BCP) e blocos maciços de concreto convencional (BM), como pode ser visto na figura 12.

Figura 12. Superfície com blocos de concreto poroso - BCP (1) e blocos maciços de concreto convencional - BM (2).



As mesmas estão localizadas na Estação Experimental da Universidade Federal do Tocantins (EEUFT), também conhecida como Estação Experimental Fazendinha.

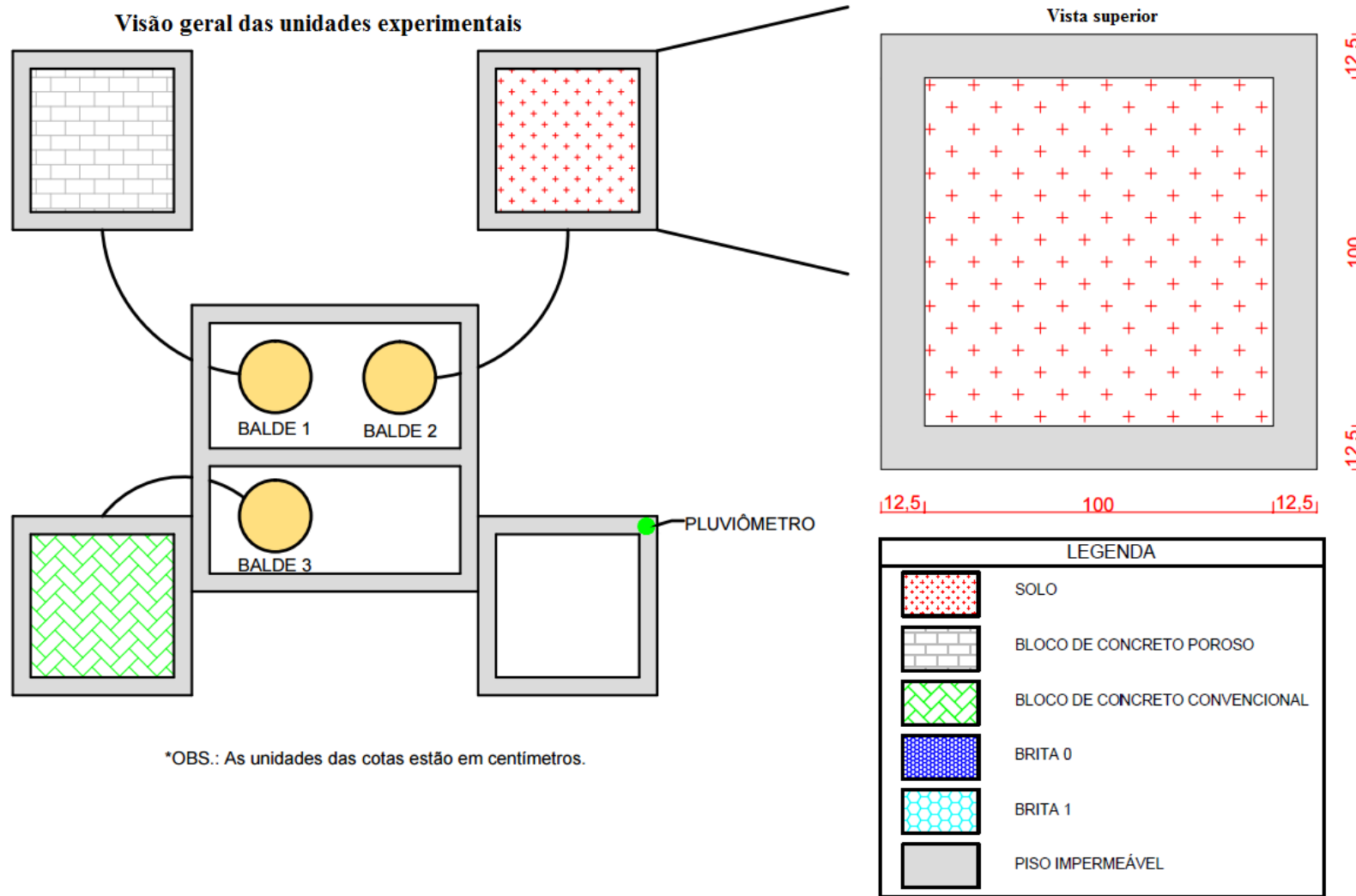
Figura 13. Localização das unidades experimentais do projeto.



Fonte: Google Earth (2017).

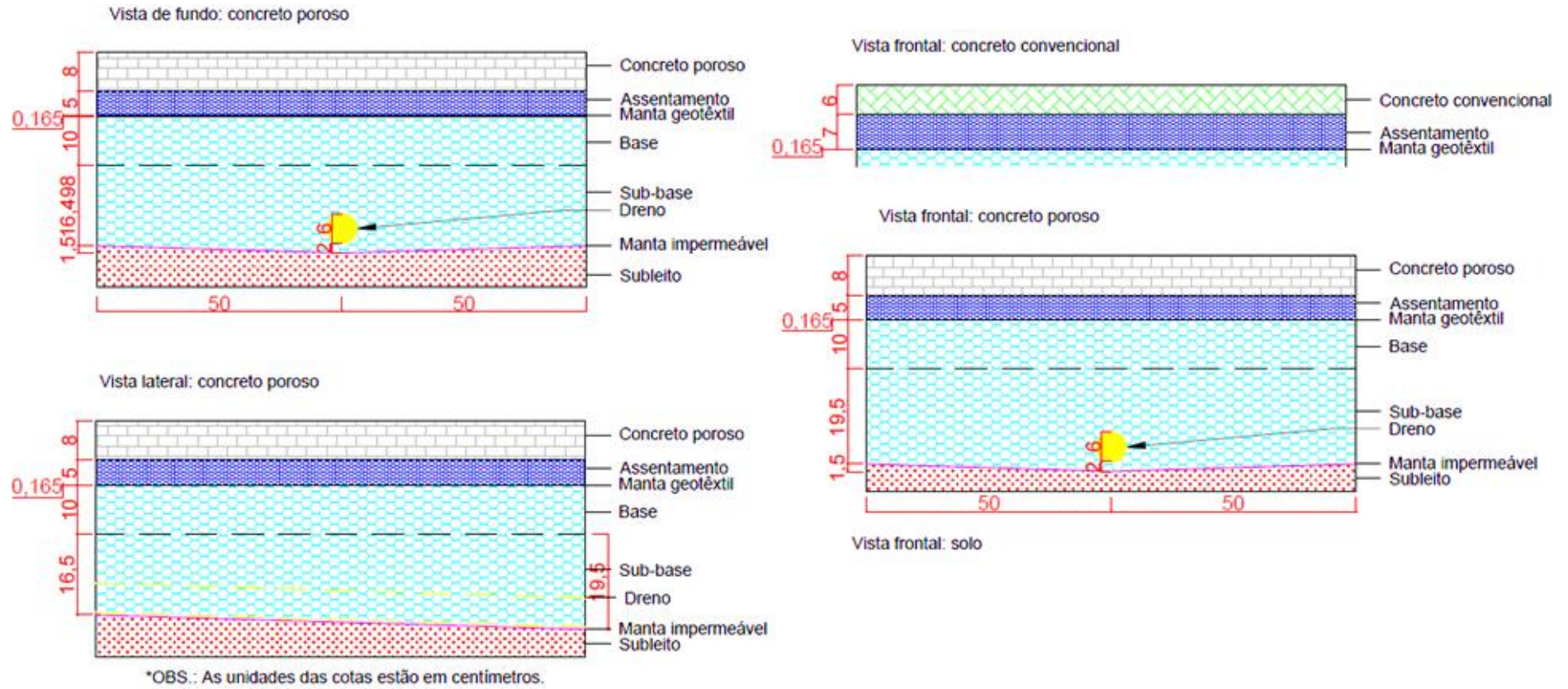
A seguir são apresentadas as vistas (layouts) das unidades experimentais, com detalhe para as espessuras das camadas (figuras 14 e 15).

Figura 14. Visão geral das unidades experimentais e vista superior em detalhe.



\*OBS.: As unidades das cotas estão em centímetros.

Figura 15. Vistas de fundo, lateral e frontais em detalhe.





Para os ensaios de infiltração também foram escolhidas três parcelas de solo na Estação Experimental da Universidade Federal do Tocantins – EEUFT próximas as unidades experimentais citadas anteriormente.

Segundo o mapa de solos do município de Palmas (PREFEITURA MUNICIPAL DE PALMAS, 2015), o solo da UFT é um Latossolo Vermelho-Amarelo e pertencente à Região Fitoecológica da Savana (domínio do Cerrado). Para caracterização do solo foram coletadas amostras com auxílio de trado holandês em três pontos diferentes nas proximidades da Estação Experimental. Em cada ponto foram feitas três perfurações com o trado a uma profundidade de 30 cm. As amostras foram preparadas conforme NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016) e enviadas para o Laboratório Zoofértil. Foram feitas análises de textura, densidade real, densidade aparente, porosidade total e matéria orgânica. Esses ensaios seguiram o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997).

#### **4.3.2 Infiltração com uso do simulador de chuva**

Nessa fase da pesquisa foram simuladas precipitações sobre as unidades experimentais com BCP e BM e sobre as três parcelas de solo usando o simulador desenvolvido. Foi escolhida uma chuva de igual intensidade para todas as superfícies. A intensidade adotada foi definida após a etapa de calibração do simulador com uso da válvula solenoide levando em consideração alguns trabalhos de referência, entre eles o de Bruno (2011), Guedes (2015) e Moura (2005). A intensidade também deveria ser capaz de gerar escoamento superficial tanto nos blocos quanto no solo, uma vez que para utilizar o simulador para medir a infiltração é necessário que o mesmo produza uma chuva com intensidade maior que a taxa de infiltração final da superfície escolhida. Por isso, antes de definir a intensidade foram feitos alguns testes para verificar se a intensidade atendia esse requisito.

##### **4.3.2.1 Blocos de concreto poroso (BCP) e blocos maciços de concreto convencional (BM)**

Nos pavimentos estipulou-se uma chuva com duração máxima de uma hora, tempo este que foi definido levando em consideração trabalhos de referência. Foram feitas três simulações de chuva de mesma intensidade para o BCP e três para o BM, com intervalo mínimo de 24 horas entre duas simulações.

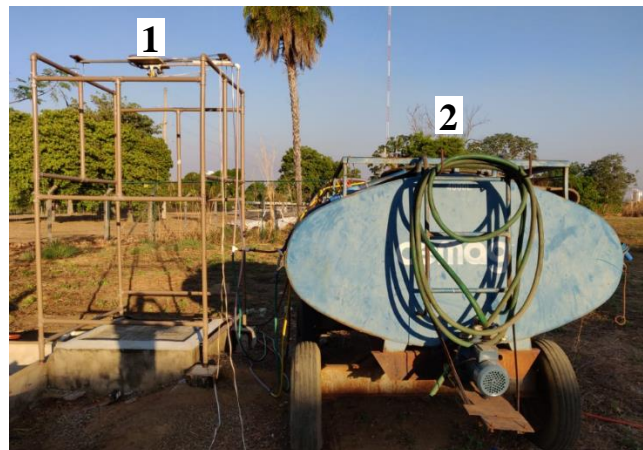
Nesta etapa foi necessário a construção da calha coletora do escoamento superficial que apresentava apenas dreno para coleta do volume drenado de fundo. Em seguida, foi feita a impermeabilização das juntas das calhas, cobriu-se a calha com uma chapa de aço galvanizado (figura 16) e por fim realizou-se a limpeza das superfícies.

Figura 16. Detalhe da calha coletora do escoamento superficial.



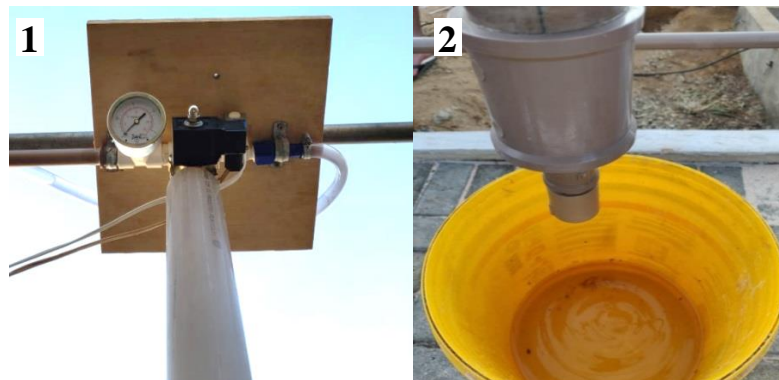
Antes de iniciar as precipitações o simulador era posicionado sobre a superfície a ser ensaiada, de modo que o mesmo ficasse centralizado e nivelado (figura 17).

Figura 17. Simulador de chuva (1) e o reservatório de água móvel (2).



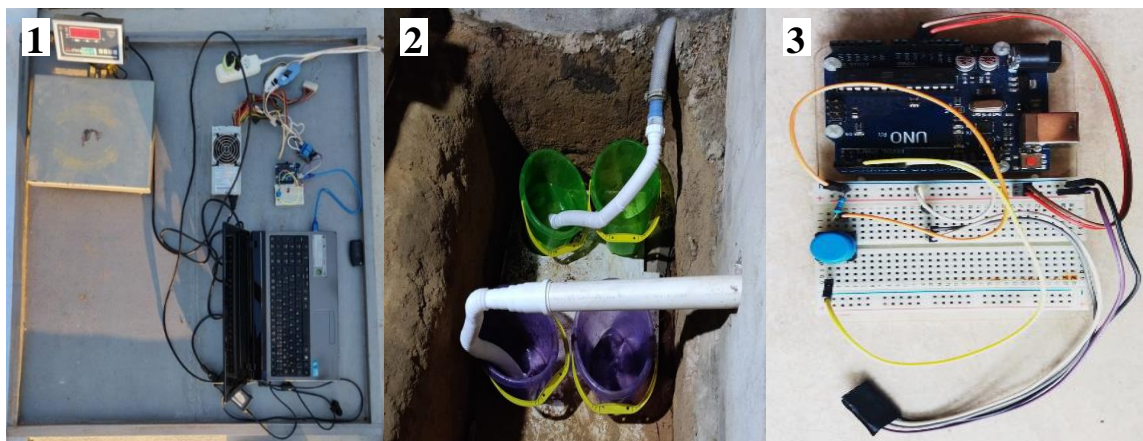
Para fazer a calibração da pressão antes de iniciar os testes, um tubo PVC de 2” era posicionado sobre o aspersor (figura 18-1), ligava-se a bomba e o Arduino e com o auxílio de um balde coletor a pressão de trabalho era ajustada (figura 18-2). Com a pressão definida reiniciava-se o Arduino e a simulação era iniciada.

Figura 18. Tubo posicionado sobre o aspersor (1) e balde coletor (2).



Os tempos de leitura (em minutos) do escoamento superficial para as duas superfícies foram: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 18, 21, 24, 27, 30. Depois dos 30 minutos, os escoamentos passaram a ser quantificados de 5 em 5 minutos até se chegar aos 60 minutos, tempo final da precipitação. Finalizada a simulação, ainda foram feitas leituras de 1 em 1 minuto até que não houvesse mais escoamento superficial de água. Para o volume drenado de fundo a leitura foi feita até os 90 minutos, com intervalo de 5 minutos. Na figura 19-1 são apresentados a balança analítica, notebook, Arduino e suas conexões, fonte de computador, fiação elétrica, na figura 19-2, os baldes coletores do volume drenado de fundo em verde e os coletores de escoamento superficial em roxo e na figura 19-3, o detalhe do Arduino e da Protoboard.

Figura 19. Equipamentos usados nos testes (1), baldes coletores (2) e detalhe do Arduino (3).



Para estudo do comportamento dos blocos foi considerada como variável de entrada, a precipitação, e como variáveis de saída, o escoamento superficial, a drenagem de fundo e a infiltração.

Para se obter o volume infiltrado fez-se a diferença do volume precipitado, encontrado na calibração do simulador, pelo volume escoado superficialmente, obtido pela água coletada na calha coletora do escoamento superficial. Para determinar o volume drenado de fundo, fez-se a quantificação do volume coletado a partir do dreno instalado na base das unidades de drenagem. O volume armazenado foi obtido pela diferença entre volume infiltrado e o volume drenado de fundo. Além dessas variáveis foram tabelados o tempo de precipitação, o tempo de início da drenagem de fundo, o tempo final do escoamento superficial, a taxa de pico do escoamento superficial, tempo da taxa de pico do escoamento superficial e tempo de embebição ou empoçamento que é o tempo que se gasta do início da precipitação até o início do escoamento superficial.

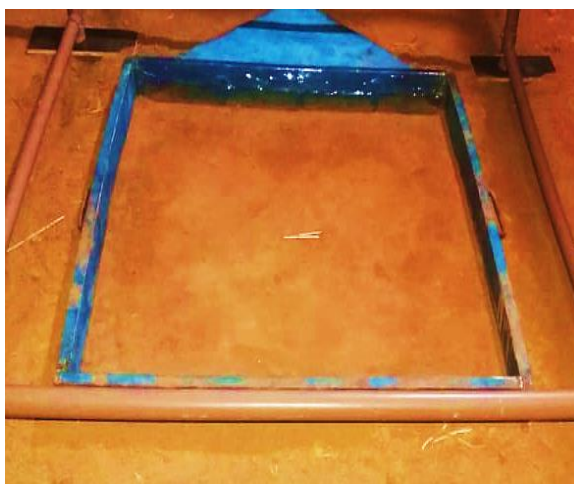
Com esses dados foi possível calcular a taxa de infiltração observada, a taxa de escoamento superficial e a taxa de drenagem de fundo (no caso do BCP) e construir os gráficos que são apresentados nos resultados.

Também foram calculados os coeficientes de escoamento superficial para as três superfícies através da razão entre o volume escoado e o precipitado, e esse coeficiente representa a porcentagem de chuva que se transforma em escoamento (GUEDES; SILVA; SIQUEIRA, 2013).

#### 4.3.2.2 Solo

Antes da execução das simulações de chuva, foi feita a limpeza superficial do solo e logo após, instalou-se a forma coletora que foi cravada ao solo com marreta e um pedaço de caibro. A forma apresenta uma área de coleta de 1 m<sup>2</sup> e uma calha coletora de escoamento superficial (figura 20).

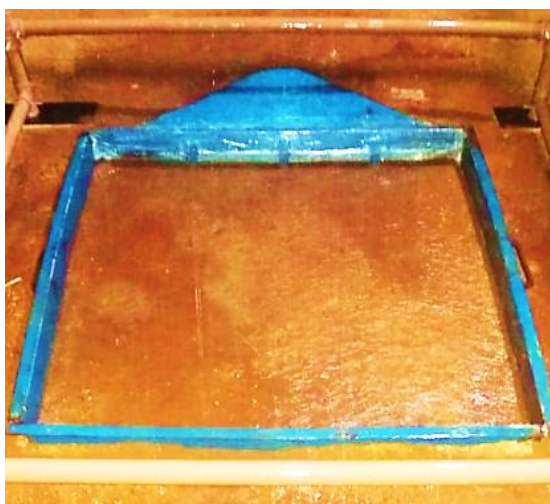
Figura 20. Forma cravada ao solo.



Para iniciar as precipitações, o mesmo processo de centralização e nivelamento feito nos blocos foi repetido para o solo. Os tempos de leitura também foram idênticos. A diferença esteve na duração da precipitação, que nesse caso durou até a estabilização da taxa de infiltração.

A água escoada superficialmente foi direcionada através de uma mangueira para uma vala a cerca de 1,5 m onde ficavam os baldes coletores. Os baldes eram pesados e anotava-se os valores dos mesmos.

Figura 21. Superfície do solo durante a chuva.



Para estudo do comportamento do solo foram observadas as mesmas variáveis que já foram mencionadas nos blocos, com exceção do volume drenado de fundo, já que no solo não foi instalado dreno para fazer essa medição. Os gráficos e tabelas para essa superfície seguiram os mesmos passos já descritos nos blocos no item anterior.

#### **4.3.3 Ensaio de Permeabilidade *in situ***

Para fazer a determinação do coeficiente de permeabilidade das superfícies com blocos, usou-se a NBR 16416 – Pavimentos Permeáveis de Concreto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) que incorporou o método de ensaio apresentado pela Norma Internacional ASTM C1701 – Standard Test Method for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete. Para este ensaio foi usado um cilindro vazado de zinco com diâmetro de 300 mm e altura de 400 mm. A superfície do pavimento foi limpa sendo retirados sedimentos depositados e não aderidos ao pavimento. O cilindro foi posicionado no local do ensaio e fez-se a vedação da parte do anel que estava em contato com o pavimento com o uso de massa de calafetar para evitar vazamentos (figura 22).

Figura 22. Cilindro fixado sobre os blocos de concreto.





Com o cilindro instalado, foi feita a pré-molhagem, despejando-se 3,6 kg de água no cilindro e cronometrou-se o tempo necessário para que toda a água infiltrasse. Se o tempo da pré-molhagem fosse inferior a 30 segundos, utilizava-se 18 kg de água no ensaio para fazer a determinação do coeficiente de permeabilidade e se o tempo de pré-molhagem fosse superior a 30 segundos, usava-se 3,6 kg. O nível de água durante a realização do ensaio deve ser mantido entre 10 mm e 15 mm em relação à face inferior do anel. Para cálculo do coeficiente de permeabilidade usou-se a equação 12.

$$k_p = \frac{Cn \times m}{(D^2 \times t)}$$

**Equação 12**

Onde

$k_p$  = coeficiente de permeabilidade (mm/h);

$m$  = massa de água infiltrada (kg);

$D$  = diâmetro interno do cilindro de infiltração (mm);

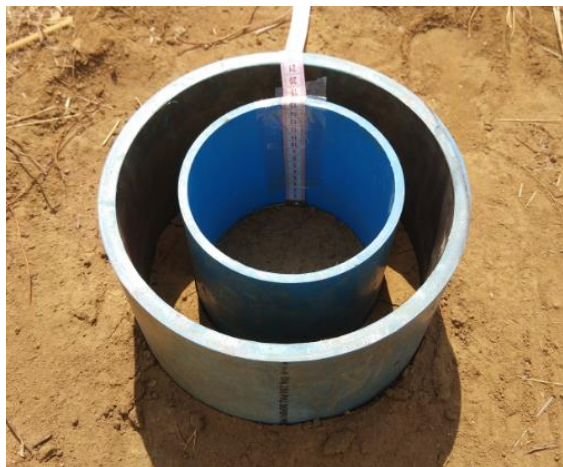
$t$  = tempo necessário para toda água percolar (s);

$Cn$  = fator de conversão de unidades do sistema SI, com valor igual 4 583 666 000.

#### **4.3.4 Infiltrômetro de anel**

Este método usa dois anéis, sendo um o anel interno com diâmetro de 150 mm e outro o anel externo com diâmetro de 300 mm, ambos com 300 mm de altura (figura 23). Esses anéis foram instalados concêntricamente, na vertical e enterrados cerca de 50 mm no solo com o auxílio de uma marreta e um pedaço de madeira. Antes da cravação dos anéis era feita uma limpeza da superfície do solo para retirada de folhas, capim e matéria orgânica morta.

Figura 23. Anéis concêntricos usados no teste de infiltração.



Para acompanhar a lâmina que era infiltrada foi usada uma fita métrica presa a face interna do cilindro de menor diâmetro. Com os anéis cravadas ao solo, pegou-se um saco

plástico que foi posto dentro do cilindro interno e colocou-se água até próximo a borda superior desse cilindro. Em seguida, preencheu-se o cilindro externo com água até o mesmo nível do cilindro interno. Com o cronômetro preparado foi feita a retirada do saco plástico e a água que estava sobre o plástico entrou em contato com o solo e iniciou-se a infiltração. Foram feitas leituras nos tempos de 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 20, 25, 30 minutos e manteve-se esse intervalo de 5 minutos até que a lâmina infiltrada fosse constante. A oscilação máxima da lâmina de água dentro do cilindro interno foi de 2 cm. Também tomou-se o cuidado de manter na mesma altura o nível de água dentro dos anéis.

#### 4.3.5 Modelo de Horton

Para estimar a taxa de infiltração das superfícies com o uso do simulador e dos anéis concêntricos, adotou-se o modelo de Horton. Este modelo foi desenvolvido por Horton em 1940. O modelo considera que a taxa de infiltração do solo é mais influenciada por fatores que operam na superfície do que pelo processo de escoamento dentro do solo (BRANDÃO; PRUSKI; SILVA, 2003). Esses fatores poderiam ser: a expansão da parte coloidal do solo diminuindo os espaços entre as partículas, a selagem do solo por partículas finas localizadas na superfície e a compactação da superfície do solo sem cobertura devido ao impacto das gotas de chuva (CARVALHO; GITIRANA JUNIOR; CARVALHO, 2012).

Horton observou que a variação da taxa de infiltração em relação ao tempo ( $\frac{di}{dt}$ ) é proporcional à diferença entre a taxa de infiltração considerada e a taxa de infiltração estável. O modelo de Horton para determinação da taxa de infiltração instantânea (BRANDÃO; PRUSKI; SILVA, 2003) é:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \times e^{-k \times t} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

$f$  = taxa de infiltração;

$f_c$  = taxa de infiltração final em condições de saturação;

$f_0$  = taxa de infiltração inicial;

$t$  = tempo;

$k$  = constante de decaimento.

A infiltração acumulada (F) no período é obtida pela integração da Equação (6).

$$F = f_c \times t + \frac{1}{k} \times (f_0 - f_c) \times (1 - e^{-k \times t}) \quad \text{Equação 14}$$

Os parâmetros  $f_c$ ,  $f_0$ , e  $k$  podem ser determinados empiricamente a partir de pares de valores simultâneos de  $F$  e  $t$  ou de  $f$  e  $t$ , caso a infiltração seja acumulada (equação 14) ou instantânea (equação 13), respectivamente.

#### 4.4 Análise estatística

Para se verificar a normalidade usou-se o teste de Shapiro-Wilk. Verificada a normalidade dos dados, estes foram submetidos à análise de variância, e quando o resultado foi significativo ao nível de 5% de probabilidade, as médias foram comparadas entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Na análise estatística foram usados o programa PAST e a ferramenta Análise de dados do Programa Excel.

Os parâmetros do modelo Horton foram ajustados buscando minimizar a soma dos desvios quadráticos entre os valores de infiltração acumulada observada e acumulada calculada. Para isso foi usado a ferramenta Solver do Programa Excel. Com as equações de taxa de infiltração, foram plotados os gráficos de taxa de infiltração em função do tempo, para as diferentes superfícies, com o intuito de melhor analisar e discutir os resultados.

Para avaliar a qualidade dos ajustes ao modelo de Horton foram feitas regressões não lineares, obtendo os respectivos coeficientes de determinação conforme equação 15. Também usou-se os índices estatísticos: coeficiente de ajuste (CA) e coeficiente de massa residual (CMR), calculados usando as equações 16 e 17, respectivamente.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{Equação 15}$$

$$CA = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad \text{Equação 16}$$

$$CMR = \frac{(\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

$O_i$  = valores observados;

$P_i$  = valores estimados;

$n$  = números de observações;

$\bar{O}$  = média aritmética dos valores observados.



O valor de CMR representa a tendência do modelo em superestimar ou subestimar os valores estimados em relação aos valores observados. Segundo Carvalho et al. (2015) se o valor observado estiver próximo do valor estimado o CMR ficará mais próximo de zero. Valores positivos de CMR indicam que o modelo subestima as medidas e os valores negativos indicam que os superestima. O melhor ajuste é observado quando os valores  $R^2$  e CA se aproximam da unidade.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Avaliação do simulador

#### 5.1.1 Uniformidade de aplicação

Os resultados dos testes de uniformidade realizados para os três modelos de aspersores em três pressões distintas podem ser vistos na tabela 1.

Tabela 1. Valores do CUC médio (%) em função da pressão e do bico adotado.

Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Bico		
	1/2 G-16	1/2 G-32	1/2 HH-36SQ
0,5	48,15	72,44	95,05
0,9	57,57	76,86	94,62
1,3	64,34	78,4	93,06

Verificou-se que os dados de CUC obtidos para os três aspersores são normais ( $p > 0,05$ ) segundo o teste Shapiro-Wilk. No teste ANOVA para o CUC em diferentes pressões para um mesmo bico obteve-se um  $p < 0,05$  para os aspersores 1/2 G-16 e 1/2 G-32, indicando uma diferença significativa entre os valores de CUC quando se variava a pressão. Fez-se o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para esses bicos observando que para o 1/2 G-16, todas as médias diferiram entre si, enquanto que para o 1/2 G-32 as médias para as pressões 0,9 e 1,3 kgf/cm são estatisticamente iguais. Já para o bico 1/2 HH-36SQ teve-se um  $p > 0,05$  demonstrando que não houve diferença significativa para o valor do CUC nas diferentes pressões.

Outro teste ANOVA foi feito para verificar se existia uma diferença estatisticamente significativa entre as médias dos CUC dos bicos. Como foi obtido um valor de  $p < 0,05$  (diferença significativa), fez-se o teste de Tukey para avaliar quais médias diferiram entre si. As médias dos três tratamentos diferiram entre si.

É possível observar que o CUC médio dos bicos 1/2 G-16 e 1/2 G-32 aumentou a medida que se elevou a pressão de serviço, tal fato também foi relatado por Montebeller et al. (2001) que afirma que isso ocorre devido ao maior fracionamento das gotas com aumento da pressão. O comportamento do bico 1/2 HH-36SQ foi distinto, apresentando uma leve queda à medida que a pressão foi subindo, provavelmente pelo fato desse aspersor apresentar um maior ângulo de aplicação que os demais, o que faz com que seu raio de molhamento aumente com a acréscimo de pressão, causando maior perda de água além da área onde estão os coletores e resultando numa redução do CUC. Mas vale destacar que essa variação no valor médio do CUC

não ultrapassou 2%, já que para menor pressão esse coeficiente foi de 95,05 % e para a maior, 93,06%.

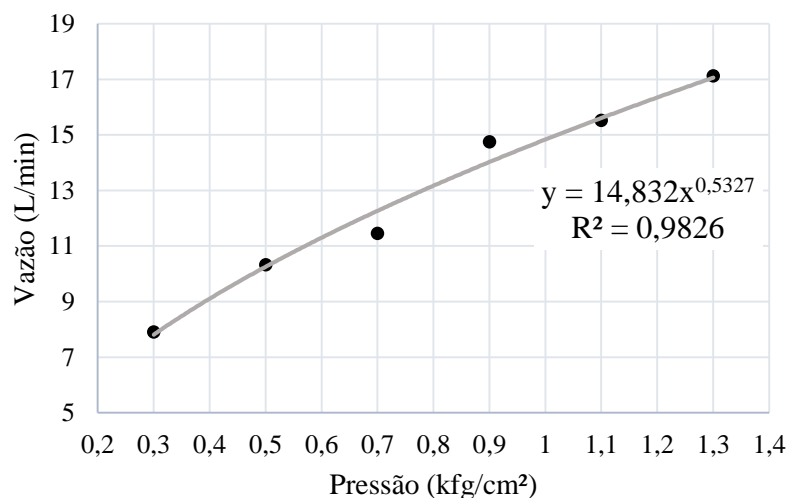
O bico 1/2 HH-36SQ apresentou CUCs superiores ao valor mínimo de 80% estipulado por Bernardo et al (2008), enquanto que os bicos aspersores 1/2 G-16 e 1/2 G-32 não atenderam esta premissa. Todos os valores de CUC para o aspersor 1/2 HH-36SQ foram superiores aos valores encontrado por Pérez-Latorre, De Castro e Delgado (2010), entre 80 e 92%, por Sousa Júnior (2011), entre 78,59 e 90,3% e por Kinner e Moody (2008), que encontraram valor máximo de 92%.

Tendo como critério base a uniformidade o bico 1/2 HH-36SQ foi escolhido para compor a construção do simulador por apresentar os maiores valores de CUC e por ter sido o único a ser avaliado como “Excelente” (CUC > 90%) em todas as pressões analisadas segundo a classificação de Montavani (2001).

### 5.1.2 Intensidade média e real da chuva

A figura 24 apresenta a curva característica do bico adotado nos ensaios, levando em consideração as médias das vazões registradas em 1 minuto nas diferentes pressões. Esse dado foi importante para dimensionar o volume de água que se devia ter no reservatório para garantir que a simulação de chuva ocorresse sem que houvesse falta de água, isso porque existiam perdas durante a simulação pelo fato de parte do volume aspergido ser lançado fora da parcela de 1 m<sup>2</sup>, em virtude do ângulo de pulverização do bico que é de cerca 78° para a pressão 0,51 kgf/cm<sup>2</sup>, segundo manual do fabricante.

Figura 24. Vazão aspergida pelo bico 1/2HH-36SQ para diferentes pressões.



A tabela 2 apresenta os valores das Im e Ir, suas médias e seus desvios padrão, além do erro relativo médio entre as duas intensidades.

Tabela 2. Valores das Im, Ir, Im média, Ir média, desvio padrão e erro relativo médio das chuvas simuladas para o bico 1/2HH-36SQ em diferentes pressões.

Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Im (mm/h)	Im média (mm/h)	Des. padrão Im	Ir (mm/h)	Ir média (mm/h)	Des. padrão Ir	Erro rel. méd. (%)
0,5	133,68			126,03			
0,5	132,15	133,23	0,94	126,32	126,20	0,15	5,57
0,5	133,87			126,24			
0,9	156,24			147,51			
0,9	156,82	156,69	0,40	146,89	147,55	0,69	6,19
0,9	157,01			148,26			
1,3	185,69			167,22			
1,3	185,31	185,25	0,48	166,28	166,85	0,50	11,03
1,3	184,74			167,04			

A pressão de trabalho e as intensidades real (Ir) e média (Im) apresentam uma correlação positiva. O erro médio entre as duas intensidades cresce com o aumento da pressão, provavelmente em virtude do CUC que decresce à medida que a pressão se eleva. Logo, é de se esperar que como a diminuição da uniformidade de aplicação do aspersor se aumente o erro entre a Im, obtida através de amostras (25 coletores) e a Ir, que leva em consideração toda precipitação que cai sobre a área de 1m<sup>2</sup>. Ao se considerar a Im como a intensidade realmente simulada se poderia chegar a conclusões erradas pois se estará superestimando o volume de água infiltrada, por exemplo.

Sousa Júnior (2011) observou que em muitos trabalhos com simuladores de chuva eram calibrados com a intensidade média e não faziam nenhum tipo de menção à intensidade real. No simulador de chuva desenvolvido pelo autor citado, se observou que para todas as pressões estudadas os valores de Im foram superiores aos de Ir. Assim como o autor citado anteriormente, os resultados alcançados aqui neste trabalho também seguiram essa mesma tendência.

A pressão de trabalho escolhida para o simulador foi de 0,5 kgf/cm<sup>2</sup> por ter alcançada o maior valor médio de CUC e também por ter tido o menor erro relativo médio entre a Im e a Ir, o que reitera a sua escolha para os testes de simulação no campo.

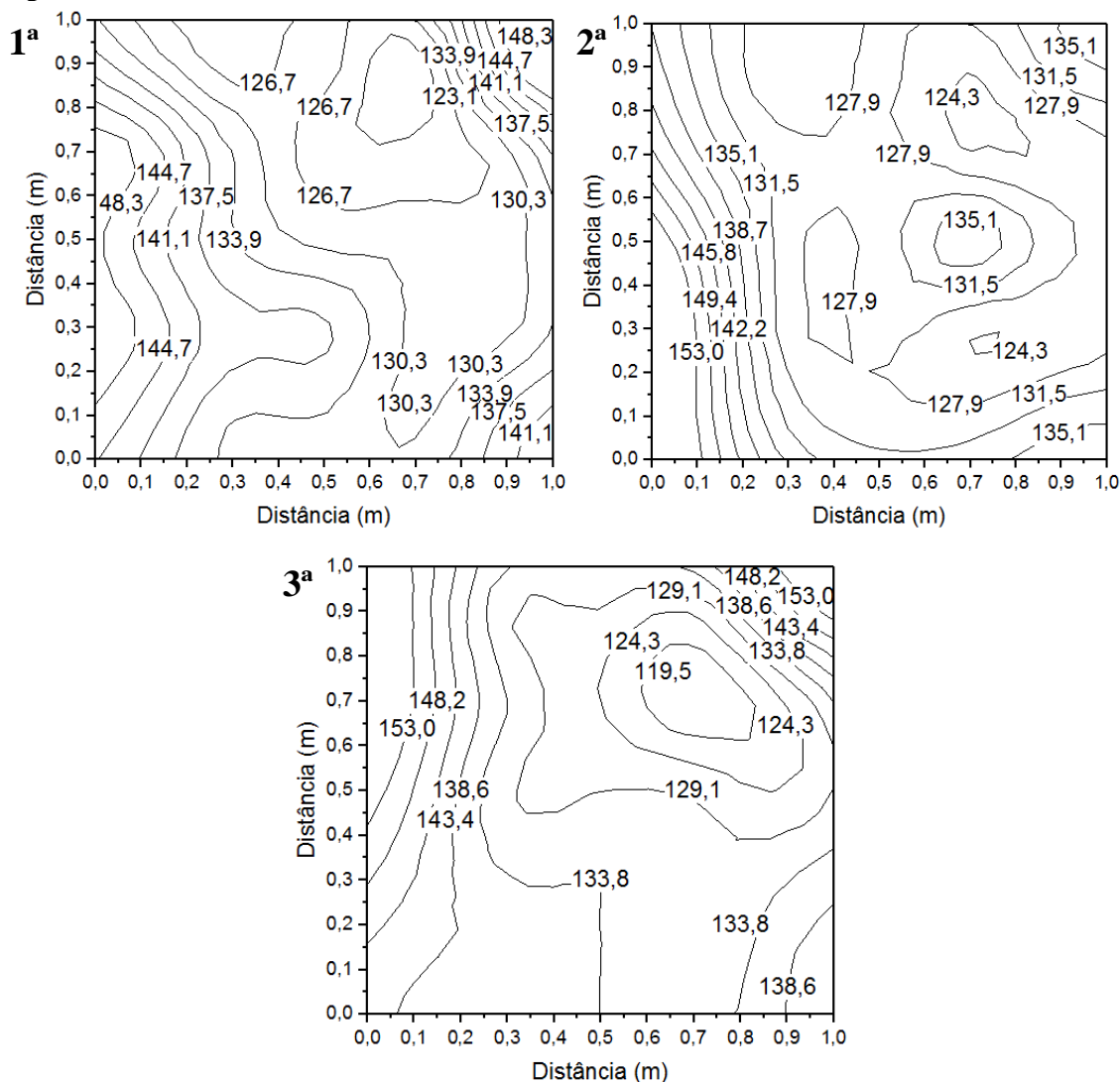
Foram calculadas as intensidades médias, seus valores máximo e mínimo e seus coeficientes de variação (CV) para pressão de 0,5 kgf/cm<sup>2</sup> usando o bico 1/2 HH-36SQ. Os resultados são apresentados na tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes de variação das Im e valor da Im mínima e máxima das três repetições para o bico 1/2 HH-36SQ e pressão de 0,5 kgf/cm<sup>2</sup>.

Repetições	CV (%)	Im mínima (mm/h)	Im máxima (mm/h)
1 <sup>a</sup>	5,97	119,5	148,2
2 <sup>a</sup>	6,34	124,3	153,0
3 <sup>a</sup>	7,14	114,7	153,0

Os coeficientes de variação das intensidades médias foram 5,94, 6,34 e 7,34%, valores estes considerados baixos (<10%) conforme classificação de Pimental-Gomes (2009). A maior diferença encontrada entre o valor máximo e mínimo das Im de precipitação foi de 38,3 mm/h, esse valor é quase sete vezes menor do que o visto por Sousa Júnior (2011) que encontrou uma variação de até 260 mm/h em simulação com CUC acima de 82,2%. Isso demonstra que o bico possui uma boa distribuição sobre a área de 1 m<sup>2</sup> estudada, como pode ser visto na figura 25.

Figura 25. Distribuição espacial da chuva para as três repetições realizadas usando o bico 1/2 HH-36SQ e pressão de 0,5 kgf/cm<sup>2</sup>.



Uma premissa que o simulador desenvolvido deveria atender é de ser capaz de simular precipitações que atingissem ou igualasse o valor máximo da intensidade estimada através da equação da chuva de Palmas – TO, levando em consideração os tempos de retorno estabelecidos para microdrenagem pelo Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas – TO (PREFEITURA MUNICIPAL DE PALMAS, 2014) e os tempos de duração escolhidos. A tabela 4 apresenta os resultados dos cálculos das intensidades em mm/h para os tempos de retorno e durações de eventos chuvosos escolhidos.

Tabela 4. Intensidades de chuva para Palmas – TO.

Tempo de retorno (anos)	Duração (minutos)	Intensidade (mm/h)
2	10	102,0
5		112,2
10		120,6
2	30	61,6
5		67,7
10		72,8
2	60	41,3
5		45,4
10		48,8

O simulador apresentou intensidades máximas da ordem de 166 mm/h, sendo capaz de simular chuvas acima 120,6 mm/h, intensidade essa equivalente a uma chuva de 10 minutos de duração para um período de retorno de dez anos para a cidade Palmas – TO, atendendo assim a premissa de sua construção.

### 5.1.3 *Calibração da intensidade da chuva*

Os valores da intensidade real gerada em função do tempo de abertura (TA) e do tempo de fechamento (TF) da válvula solenoide, sua média ( $I_r$  média) e desvio padrão (DP) são listados na tabela 5.

Tabela 5. Intensidade real em função do tempo de abertura e fechamento da válvula solenoide.

TA (s)	TF (s)	Ir (mm/h)	Ir média (mm/h)	DP	TA (s)	TF (s)	Ir (mm/h)	Ir média (mm/h)	DP
5	1	111,30	111,64	1,22	1	9	21,66	21,58	0,42
		110,63					21,12		
		112,99					21,95		
1	5	37,77	37,16	1,77	7	3	87,10	87,82	0,73
		38,55					88,56		
		35,17					87,80		
5	5	70,90	71,14	0,56	3	7	43,19	43,19	0,64
		70,75					42,55		
		71,79					43,84		
7	8	62,71	63,47	0,80	3	3	78,30	79,11	0,72
		64,31					79,38		
		63,39					79,67		
2	4	56,93	57,70	0,82	3	1	108,78	109,12	0,32
		57,62					109,42		
		58,56					109,17		
4	2	93,81	94,45	2,03	1	3	55,47	56,11	1,00
		96,71					57,26		
		92,81					55,60		
4	1	108,61	107,85	0,84	8	7	69,88	70,08	0,52
		106,96					70,67		
		107,99					69,69		
1	4	43,80	43,90	0,19	3	2	87,01	88,22	1,09
		43,78					89,10		
		44,13					88,56		
9	1	126,29	125,72	0,50	2	3	70,09	70,20	0,42
		125,33					69,84		
		125,54					70,67		

A análise dos resíduos demonstra que os erros do modelo se distribuem de forma normal, já que para teste de Shapiro-Wilk o valor de P (0,2781) é maior que 5% (nível de significância). Assim sendo o modelo desenvolvido atende aos requisitos de regressão. O ajuste dos dados ao modelo resultou na equação 18. Os dados apresentaram um bom ajuste ao modelo com  $R^2$  de 0,988. A equação é válida para os intervalos:  $1,0 \leq TA \leq 9,0$  e  $1,0 \leq TF \leq 9,0$ .

$$Ic = 98,385 + 9,775 \times TA - 19,855 \times TF - 0,583 \times TA^2 + 1,117 \times TF^2 + 0,248 \times TA \times TF$$

**Equação 18**

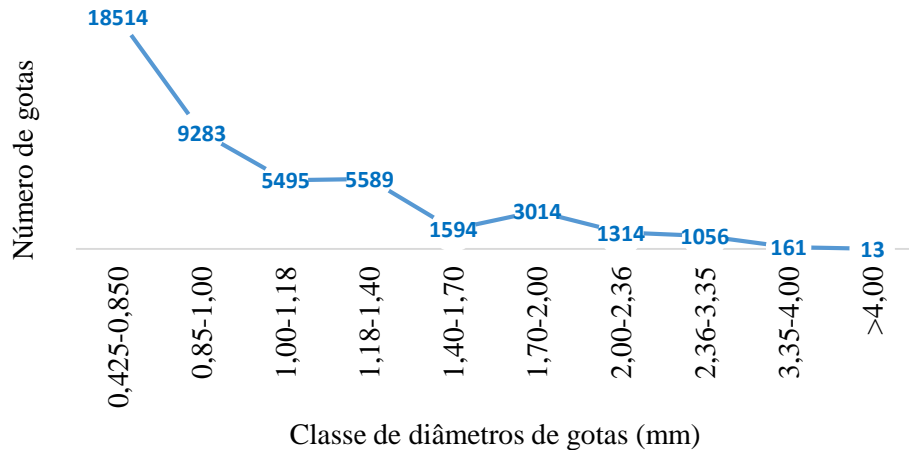
Onde:

$Ic$  = intensidade calculada (mm/h);

### 5.1.4 Diâmetro da gota e energia cinética

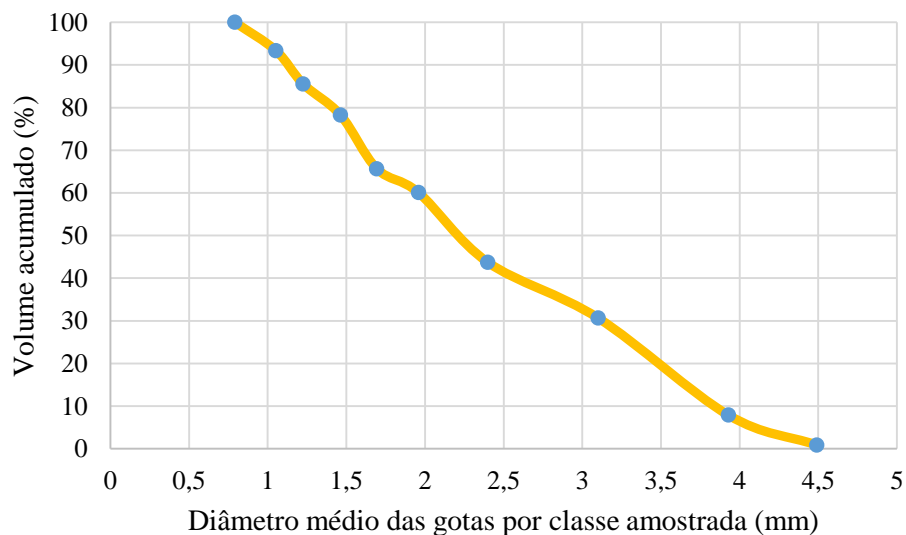
A figura 26 mostra a distribuição da quantidade de gotas obtidas por classe de diâmetro para a pressão de trabalho escolhida.

Figura 26. Distribuição da quantidade de gotas amostradas por classe de diâmetro.



Através dos resultados do diâmetro médio das gotas por classe amostrada e volume de gotas acumulado foi possível traçar a curva de distribuição do tamanho das gotas (figura 27), que permitiu determinar o diâmetro médio das gotas (D50) da chuva produzida.

Figura 27. Volumes acumulados versus diâmetro médio de gota por classe amostrada.

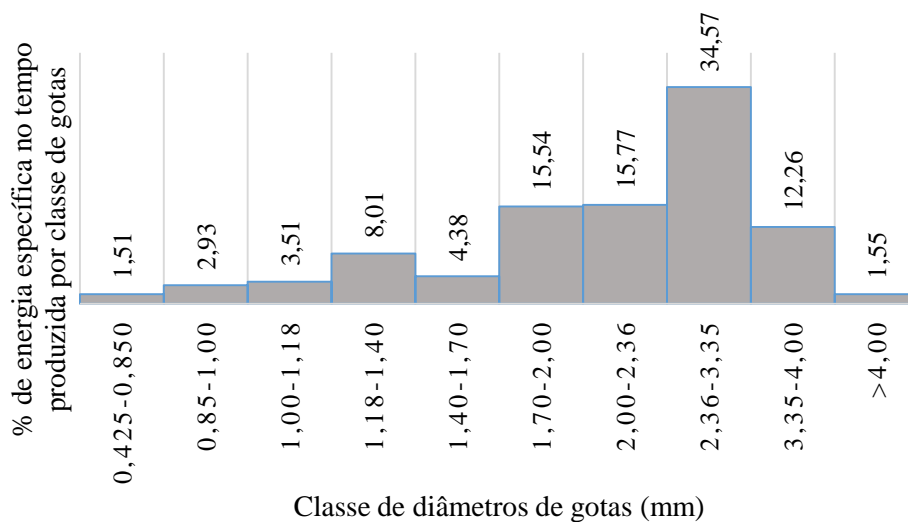


O valor do diâmetro médio das gotas (D50) para a pressão 0,5 kgf/cm<sup>2</sup> foi de 2,23 mm. Segundo Hudson (1963) citado por Miguntanna (2009), o diâmetro médio das gotas de uma chuva natural está entre 2,0 e 2,50 mm. Sousa Júnior (2011) obteve para pressão de 0,51 kgf/cm<sup>2</sup> um D50 de 2,5 mm, enquanto Carvalho et al. (2012b) para pressão de 0,61 kgf/cm<sup>2</sup>



encontrou aproximadamente 2,00 mm, estando o D50 obtido nos ensaios entre esses valores determinados por esses dois autores. Na figura 28 se tem a porcentagem de energia cinética produzida por cada classe de diâmetro de gota.

Figura 28. Porcentagem de energia cinética produzida por cada classe de diâmetro de gota.



As gotas com diâmetro acima de 1,70 mm são responsáveis pela geração da maior parte da energia específica no tempo ( $KE_n$ ) da chuva simulada, cerca de 80% do total. A energia específica no volume ( $KE_p$ ) calculada foi de 22,37 J/m<sup>2</sup>/mm. Esse valor equivale a cerca de 90% da energia específica de precipitações naturais com intensidades acima de 40 mm/h, que apresentam  $KE_p$  em torno de 25 J/m<sup>2</sup>/mm (VAN DIJK; BRUIJNZEEL; ROSEWELL, 2002).

## 5.2 Simulações de chuva sobre as superfícies

Para as simulações nas superfícies definiu-se que seria usado o bico 1/2 HH-36SQ, pressão de 0,5 kgf/cm<sup>2</sup>, TA de 3 segundos, TF de 3 segundos, resultando numa intensidade de precipitação de cerca de 79,11 mm/h, com duração de uma hora para o BCP e o BM, e no solo a duração se deu até se obter três valores de volume do escoamento superficial bem próximos.

### 5.2.1 Blocos maciços de concreto convencional (BM)

Na tabela 6 estão ilustrados os resultados das simulações para o BM.

Tabela 6. Resultados para o BM.

Parâmetros	Simulação 1 15/09/18	Simulação 2 16/09/18	Simulação 3 18/09/18
Volume precipitado (L)	79,11	79,11	79,11
Volume escoado superficialmente (L)	77,63	78,53	78,28
Volume infiltrado (L)	1,48	0,58	0,83
Volume armazenado (L)	1,48	0,58	0,83
Volume drenado de fundo (L)	0	0	0
Coeficiente de escoamento superficial (C)	0,9812	0,9927	0,9895
Tempo de embebição (min)	3,47	3,15	4,28
Duração da precipitação (min)	60	60	60
Tempo final do esc. superficial (min)	68,92	71,73	72,58
Taxa de pico do esc. superficial (mm/h)	73,66	78,00	78,53
Tempo da taxa de pico do esc. superficial (min)	55	7	45

Comparando os dados presentes na tabela 6, nota-se: a) o volume drenado de fundo em todas as simulações foi zero; b) a primeira simulação foi a que apresentou o maior volume de água armazenado, indicando que parte da água infiltrada foi absorvida pelos materiais que compõem o sistema em forma de umidade; c) o tempo para se chegar à taxa de pico do escoamento superficial na segunda simulação foi o menor de todos, e isso se justifica pelo intervalo entre as simulações. Para execução da segunda simulação o BM ficou em repouso apenas um dia, tendo menos tempo para que a água presente em forma de umidade nessa superfície evaporasse, enquanto que para terceira simulação o BM permaneceu em repouso por dois dias. Isso possivelmente fez com que a umidade inicial nessa superfície fosse maior do que na terceira simulação e se chegasse à taxa de pico do escoamento superficial mais rapidamente.

A superfície com BM apresentou um coeficiente de escoamento superficial (C) de 0,98, valor superior ao relatado por Castro (2011) que encontrou 0,89 e Araújo, Tucci e Goldenfum

(2000) que apontou um C de 0,78 para bloco semelhante ao usado nos estudos. O valor de C obtido no BM se aproxima mais do coeficiente de escoamento superficial do concreto convencional descrito por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), que foi de 0,95.

A infiltração nesse tipo de bloco ocorre principalmente através das juntas. Antes de iniciar os testes com o simulador verificou-se que as juntas estavam bastante seladas, uma vez que esses blocos foram instalados no ano de 2014 e estavam expostos ao acúmulo de sedimentos. Com o intuito de avaliar o bloco foi determinado o coeficiente de permeabilidade *in situ* conforme descrito no item 4.3.3. O coeficiente de permeabilidade médio foi de 2,4 cm/h. Esse coeficiente foi bem inferior ao obtido em 2014, quando apresentou um valor de 1615 cm/h após sua instalação. Na figura 29 é possível observar a lâmina de água sobre os BM mesmo após o término da precipitação.

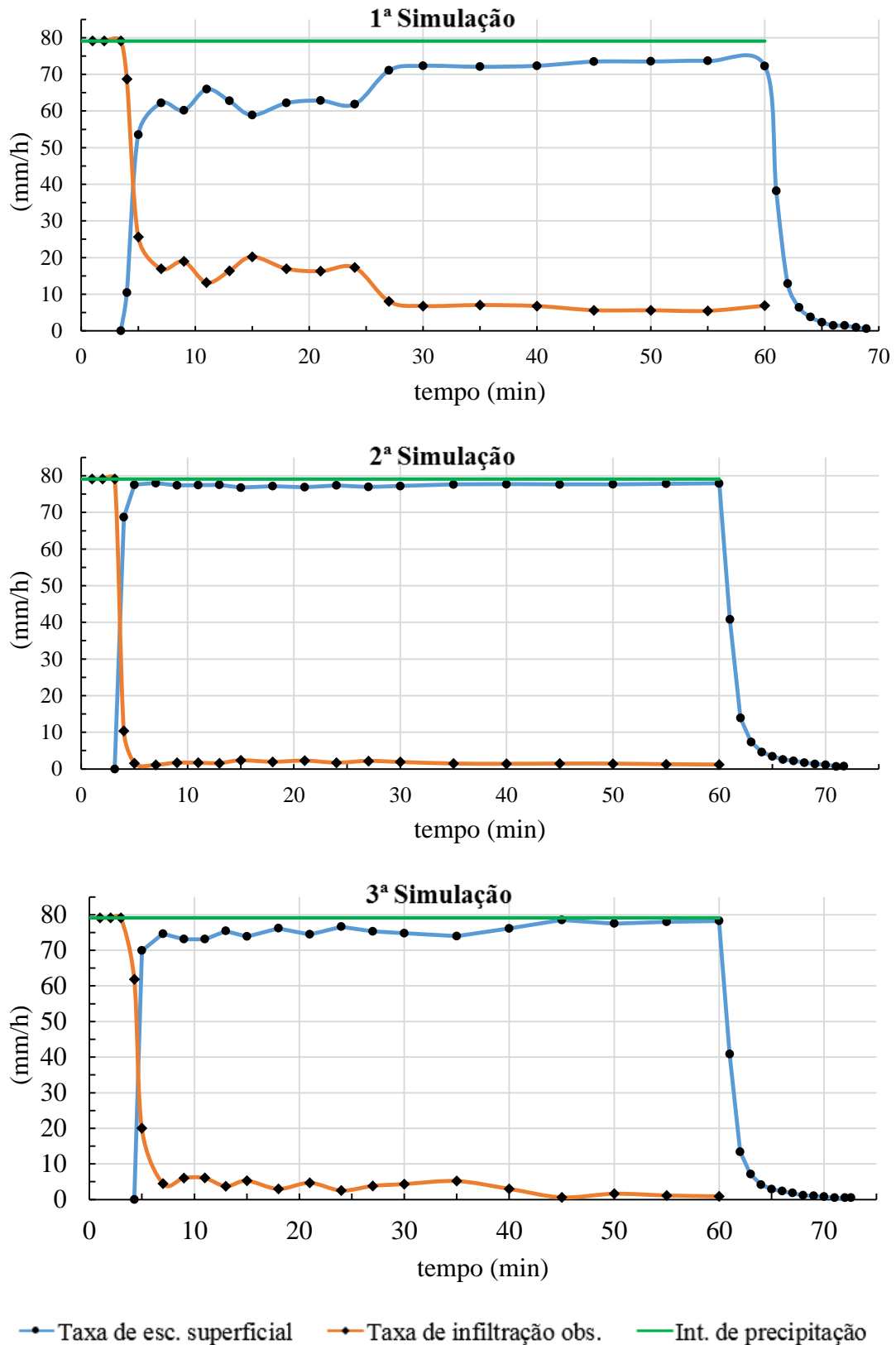
Figura 29. Lâmina de água sobre o BM.



O baixo coeficiente de permeabilidade associado ao selamento das juntas identificado visualmente na etapa de limpeza superficial dos blocos ajuda a entender os altos valores de escoamento superficial. Isso corrobora com o descrito por Guedes (2015) que ao simular chuvas em superfícies que tinham sido construídas dois anos antes por Castro (2011) afirmou que a colmatação contribuiu para que houvesse diminuição da taxa de infiltração estável.

Na figura 30 são apresentados os gráficos com as taxas de escoamento superficial, infiltração observada, drenagem de fundo e intensidade de precipitação, para as três simulações com BM.

Figura 30. Gráficos com as taxas de escoamento superficial, infiltração observada, drenagem de fundo e intensidade de precipitação para simulações de chuva com BM (1ª, 2ª e 3ª simulações).

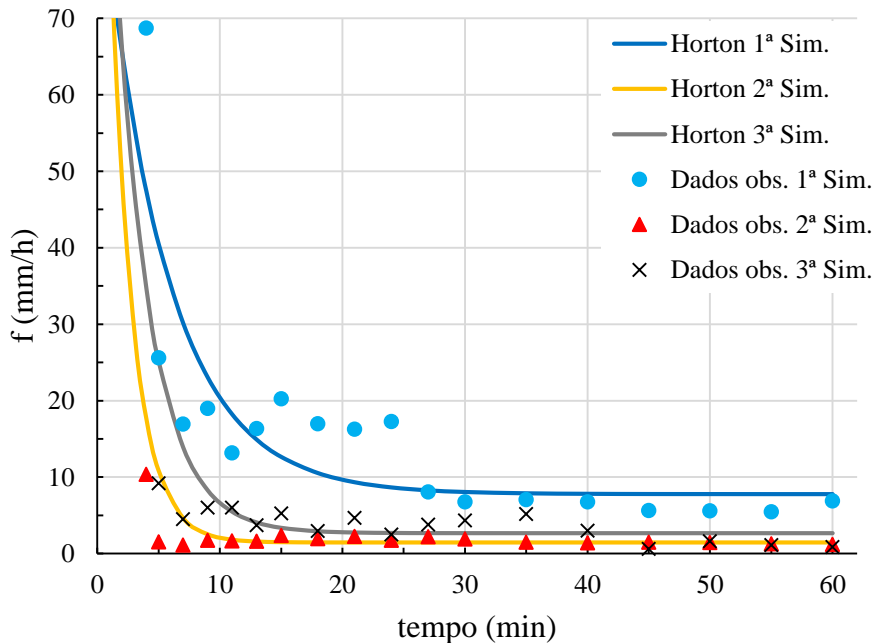


No início de todas as simulações é possível observar trechos horizontais nas curvas de taxas de infiltração. Trata-se de um intervalo de tempo necessário para que se crie uma lâmina

de água e a mesma escoar ao balde coletor, denominado tempo de embebição. Esses trechos indicam que a superfície ainda não se encontrava saturada e que a capacidade de infiltração nos instantes iniciais foi superior a intensidade de precipitação simulada. Nos gráficos das duas últimas simulações ocorre uma queda brusca na taxa de infiltração ainda nos instantes iniciais do teste e um aumento repentino da taxa escoamento superficial. Essa queda também foi observado por Bruno (2011) ao simular chuva sobre uma superfície de concreto convencional, indicando uma baixa capacidade de infiltração dessa superfície.

Os ajustes do modelo de Horton aos dados das simulações com BM são apresentados na figura 31, onde na fase de embebição tem-se a taxa de infiltração da superfície e não a capacidade desta, assim o ajuste só tem início no ponto em que a taxa se iguala a capacidade de infiltração, que corresponde ao máximo de água que um material pode absorver na unidade de tempo, por unidade de área horizontal. A curva da taxa de infiltração só vai coincidir com a curva da capacidade de infiltração se a precipitação for maior ou igual à capacidade de infiltração.

Figura 31. Ajuste do modelo de Horton aos dados observados para as simulações com BM.



Na tabela 7 são apresentados as equações e os índices estatísticos calculados para os BMs, sendo eles o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de ajuste (CA) e coeficiente de massa residual (CMR). Dos três ensaios o que obteve maior  $R^2$  foi o terceiro ensaio com um valor de 0,78. O melhor CA obtido foi para a primeira simulação, contudo ainda distante do valor 1. Quanto ao CMR para essa superfície, nota-se que a equação de Horton superestima a

taxa de infiltração, comportamento indicado pelos valores negativos deste índice em dois dos três ensaios.

Tabela 7. Equações de ajuste para o modelo de Horton e índices estatísticos R<sup>2</sup>, CA e CMR calculados para as três simulações com BM.

Simulação	Equação	R <sup>2</sup>	CA	CMR
1	$f(t) = 7,79 + (92,59 - 7,79)e^{-11,43t}$	0,70	1,40	0,01
2	$f(t) = 1,46 + (142,53 - 1,46)e^{-32,51t}$	0,75	1,79	-0,47
3	$f(t) = 2,67 + (129,82 - 2,67)e^{-20,80t}$	0,78	1,50	-0,38

Os ensaios com BM apresentaram valores da constante de decaimento ( $k$ ) entre 11,43 e 32,51 h<sup>-1</sup>. Guedes (2015) com blocos em condições parecidas de instalação encontrou  $k$  de 47,15 e 10,57 h<sup>-1</sup> com simulações de 64,20 mm/h e duração de 60 minutos. Segundo este autor o valor mais elevado de  $k$  indica um menor tempo para atingir a infiltração final, tal como observado no segundo ensaio, onde o maior valor de  $k$  obtido resultou em uma estabilização da infiltração final mais rápida, como pode ser visto na figura 31.

As médias da taxa de infiltração estável e seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação podem ser vistos na tabela 8.

Tabela 8. Valores da taxa de infiltração estável (TIE), desvio padrão e coeficiente de variação observados para as simulações com BM.

Simulação	Taxa de infiltração estável (TIE)		
	Média* (mm/h)	Desvio padrão* (mm/h)	Coefficiente de variação* (%)
1	5,97	0,77	12,94
2	1,31	0,13	9,82
3	1,19	0,37	31,36

\*Média, desvio padrão e coeficiente de variação calculados para os três últimos valores de taxa de infiltração observados.

O terceiro ensaio apresentou a menor taxa de infiltração estável entre os valores encontrados (tabela 8). Isso provavelmente ocorreu em virtude da umidade existente nos materiais antes do último ensaio, onde já tinham sido simuladas duas chuvas nos dias anteriores. Moura (2005) estudando blocos maciços sob diferentes situações encontrou valor de TIE variando de 7 a 66 mm/h. Esse autor destaca que os fatores que levaram a essa variabilidade foram a colmatação produzida pelos sedimentos, inclinação de instalação dos blocos e compactação da base de assentamento. A TIE obtida na primeira simulação BM (5,97 mm/h) foi a que mais se aproximou do valor mínimo visto por Moura (2005).

### 5.2.2 Blocos de concreto poroso (BCP)

Na tabela 9 são apresentados os resultados das simulações para o BCP.

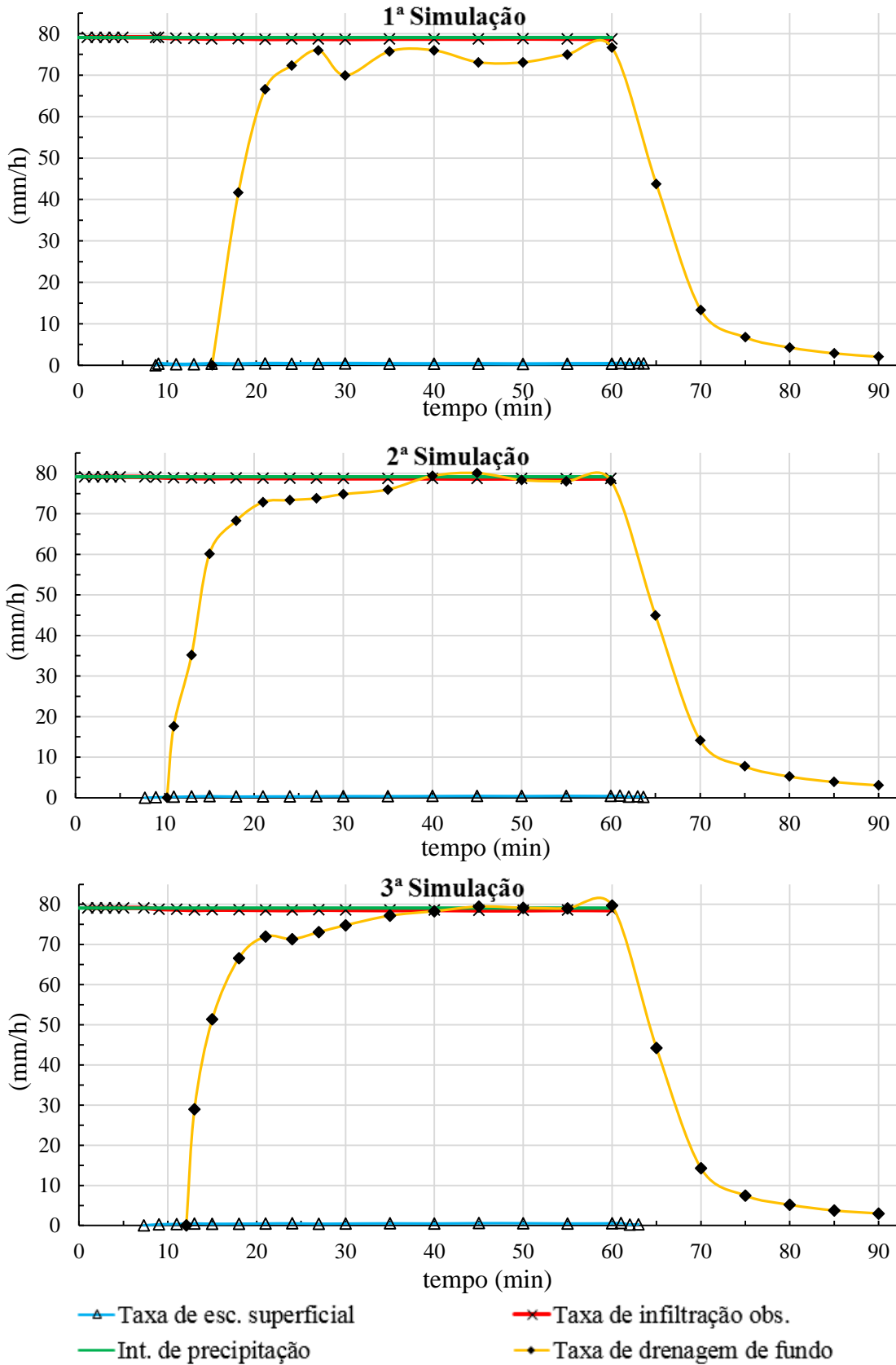
Tabela 9. Resultados para o BCP.

Parâmetros	Simulação 1 15/09/18	Simulação 2 16/09/18	Simulação 3 18/09/18
Volume precipitado (L)	79,11	79,11	79,11
Volume escoado superficialmente (L)	0,33	0,34	0,46
Volume infiltrado (L)	78,78	78,77	78,65
Volume armazenado (L)	18,94	11,48	12,73
Volume drenado de fundo (L)	59,84	67,29	65,92
Coefficiente de escoamento superficial (C)	0,0041	0,0042	0,0058
Tempo de embebição (min)	8,68	7,77	7,30
Tempo de início da drenagem de fundo (min)	15,04	10,25	12,08
Tempo de precipitação (min)	60	60	60
Tempo final do esc. superficial (min)	63,57	63,63	62,98
Taxa de pico do esc. superficial (mm/h)	0,42	0,44	0,59
Tempo da taxa de pico do esc. superficial (min)	21	55	45

A primeira simulação foi a que apresentou o maior armazenamento de água, indicando que parte da precipitação ficou retida em formato de umidade junto aos materiais que compõem o sistema. Isso é reforçado pelo tempo de embebição e pelo tempo necessário para início da drenagem de fundo, que foram os maiores entre os três ensaios. Na segunda simulação que foi repetida 24 horas após a primeira, observa-se a diminuição do volume armazenado, já que o sistema tinha recebido a precipitação no dia anterior. Este resultado sugere que havia no segundo ensaio maior umidade na camada de armazenamento em relação ao primeiro ensaio. Na terceira repetição que ocorreu 48 horas após a segunda, teve-se a maior taxa de pico do escoamento superficial refletindo no maior coeficiente de escoamento superficial entre as simulações.

Na figura 32 é possível observar os gráficos com as taxas de escoamento superficial, infiltração observada, drenagem de fundo e intensidade de precipitação, para as três simulações com BCP.

Figura 32. Gráficos com as taxas de escoamento superficial, infiltração observada, drenagem de fundo e intensidade de precipitação para simulações de chuva com BCP (1ª, 2ª e 3ª simulações).





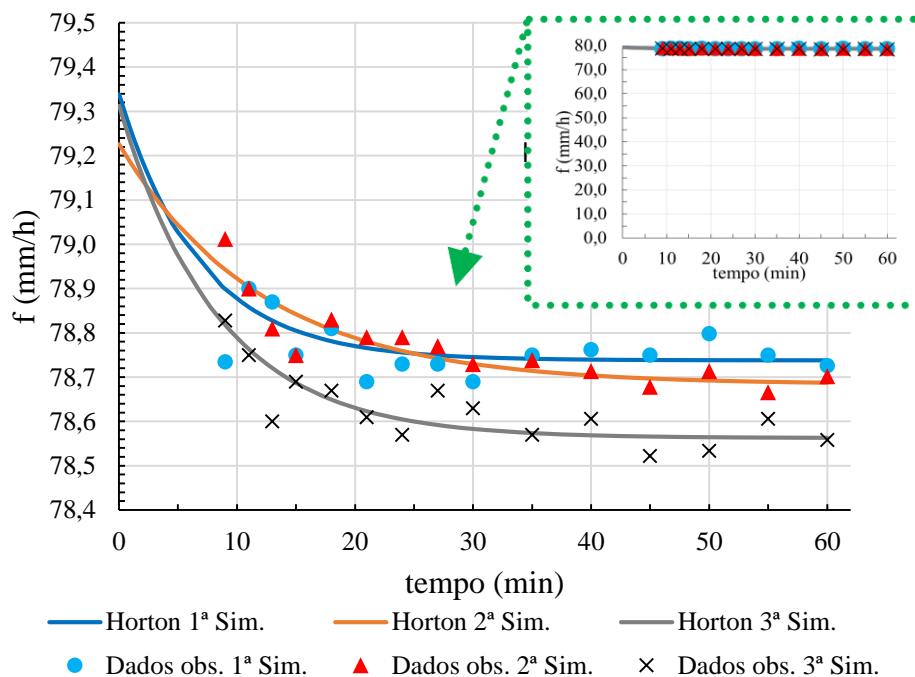
No que se refere à drenagem de fundo, verificou-se que a mesma começou entre 10 e 15 minutos após o início da precipitação. O final do escoamento superficial para os três ensaios esteve próximo aos 63 minutos. A porcentagem de água precipitada e que ficou armazenada nos vazios, depressões e em forma de umidade variou entre 14,5 e 24%.

O coeficiente de escoamento superficial (C) não chegou a 0,01, inferior ao relatado por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) com C de 0,05 em seus estudos com concreto poroso e dentro da faixa descrita por Castro (2011) com C indo de 0 até 0,27.

O coeficiente de permeabilidade calculado foi de 1587 cm/h e ajuda a entender o baixo valor encontrado para o C neste tipo de bloco. Entretanto, há indícios de colmatção, pois na sua instalação em 2014 obteve-se um coeficiente de permeabilidade de 4813,02 cm/h. Logo, o valor atual é cerca de 3 vezes menor daquele visto na implantação.

Os ajustes do modelo de Horton aos dados observados nas simulações com BCP são vistos a seguir.

Figura 33. Ajuste do modelo de Horton aos dados observados para as simulações com BCP.



A oscilação dos dados observados pode ser atribuída à variação da pressão devido à abertura e fechamento da válvula solenoide durante a simulação de chuva. Esta oscilação também foi vista por Silva (2006) e Guedes (2015). Na tabela 10 são apresentadas as equações e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de ajuste (CA) e coeficiente de massa residual (CMR) que foram calculados.

Tabela 10. Equações de ajuste para o modelo de Horton e índices estatísticos R<sup>2</sup>, CA e CMR calculados para as três simulações com BCP.

Simulação	Equação	R <sup>2</sup>	CA	CMR
1	$f(t) = 78,74 + (79,34 - 78,74)e^{-8,78t}$	0,78	1,32	0,00
2	$f(t) = 78,68 + (79,23 - 78,68)e^{-4,92t}$	0,91	1,04	0,00
3	$f(t) = 78,56 + (79,31 - 78,56)e^{-7,20t}$	0,88	1,03	0,00

Das três simulações a que obteve melhor coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) foi a segunda com um R<sup>2</sup> de 0.91. A primeira simulação foi a que teve o menor R<sup>2</sup> e também, apresentou o valor de CA mais distante da unidade. As equações estimam com boa exatidão a taxa de infiltração, pois os valores de CMR estão próximo a zero.

Os valores de *k* obtidos foram 4,92, 7,20 e 8,78, enquanto que Guedes (2015) em chuvas aplicadas sobre o concreto poroso achou *k* de 17,53 e 2,92. Segundo esse autor, valores nesse intervalo indicam uma condição favorável no controle da produção do escoamento com decaimento lento e gradual da taxa de infiltração. Os valores de *k* encontrados (tabela 10) estiveram dentro da faixa descrita pelo autor. Na tabela 11 são apresentadas as médias da taxa de infiltração estável e seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação.

Tabela 11. Valores da taxa de infiltração estável (TIE) observada para as simulações com BCP.

Simulação	Taxa de infiltração estável (TIE)		
	Média* (mm/h)	Desvio padrão* (mm/h)	Coefficiente de variação* (%)
1	78,76	0,04	0,05
2	78,69	0,02	0,03
3	78,57	0,04	0,05

\*Média, desvio padrão e coeficiente de variação calculados para os três últimos valores de taxa de infiltração observados.

Os valores da taxa de infiltração estável para esse bloco estiveram acima da TIE máxima observada por Guedes (2015), que foi de 70,68 mm/h, e bem próximos daqueles observados por Bruno (2011) para blocos de concreto vazados (78,07 e 84,00 mm/h). Já os coeficientes de variação das TIEs apresentaram valores baixos segundo a classificação de Pimentel-Gomes (2009).

### 5.2.3 Solo

Os resultados das análises físicas (textura, densidade e porosidade) e química (teor de matéria orgânica) do solo nos três pontos de coleta podem ser vistos na tabela 12.

Tabela 12. Resultados das análises físicas e química das amostras de solo.

Amostra	Argila	Silte	Areia	Dens. real	Dens. aparente	Porosidade	Matéria orgânica
	-----g/Kg-----			-----g/cm <sup>3</sup> -----		-----%-----	
1	260	8	732	3,20	1,56	51	0,30
2	200	28	772	3,10	1,40	55	0,30
3	200	20	780	3,03	1,50	50	0,30

Pelo diagrama triangular de Feret, o solo apresenta textura franco argilosa arenosa. Este solo apresenta uma baixa porcentagem de matéria orgânica (0,30%) quando comparada aos valores encontrados em cerrado virgem, que é de 4,2 a 5,6%, e aos observados em cerrado onde existe algum tipo de cultivo, que é 2,8 a 2,9%, conforme estudo de Resck, Pereira e Silva (1991). A porosidade total do solo estudado se aproximou ao valor indicado para solos que já sofreram algum tipo de cultivo, que é de 50,2 a 50,7% (RESCK, 1981). A densidade aparente apresentou valor médio de 1,49 g/cm<sup>3</sup>, estando dentro da faixa relatada por Rodrigues, Maltoni e Cassiolato (2007), de 1,47 a 1,59 g/cm<sup>3</sup> em solo exposto do cerrado. Na tabela 13 estão listados os resultados dos ensaios para os solos com uso de simulador.

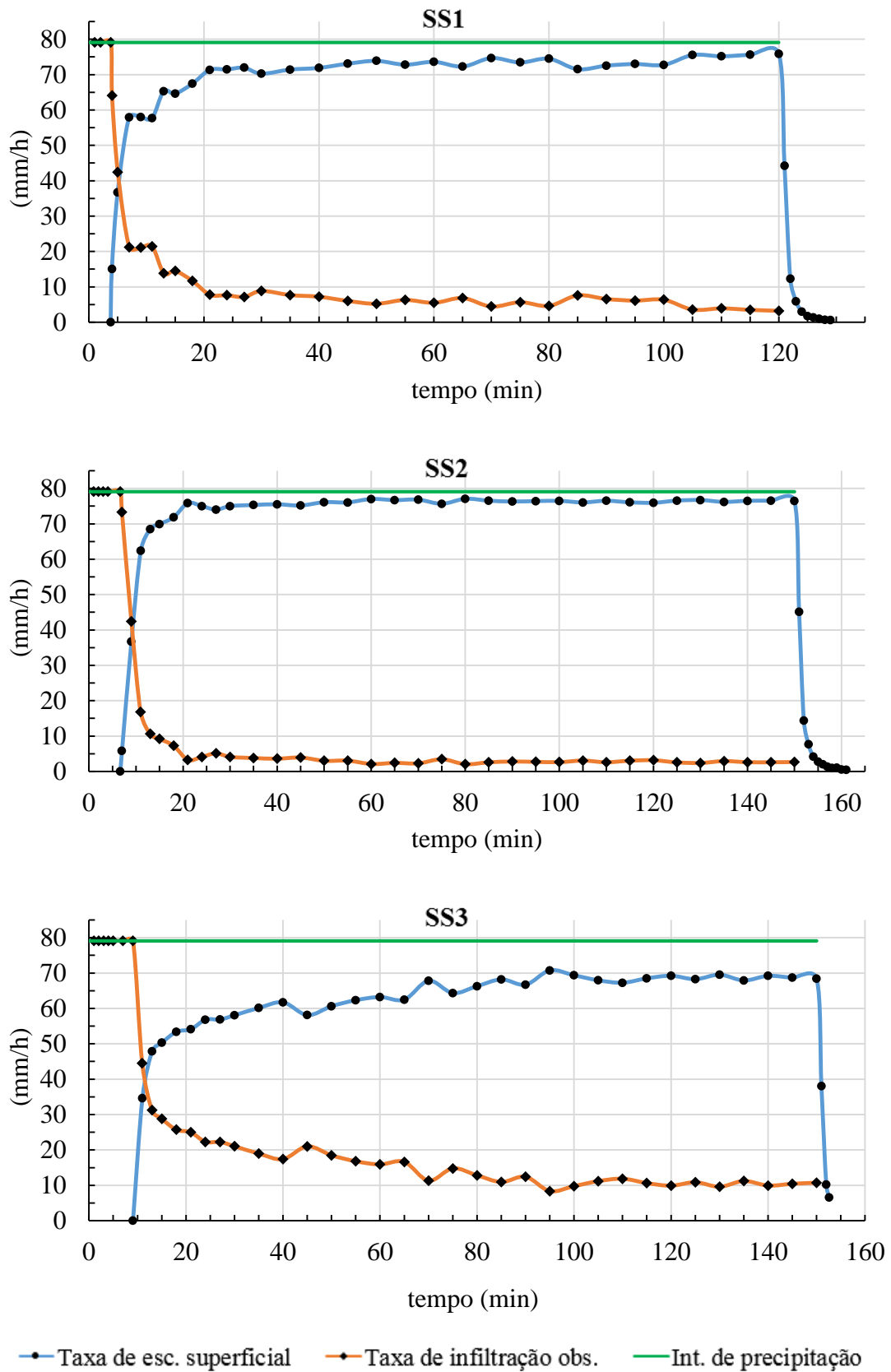
Tabela 13. Resultados para o solo exposto.

Parâmetros	SS1	SS2	SS3
	14/09/18	17/09/18	19/09/18
Volume precipitado (L)	158,22	197,78	197,78
Volume escoado superficialmente (L)	139,87	180,39	151,46
Volume infiltrado (L)	18,35	17,38	46,31
Coefficiente de esc. superficial (C)	0,8840	0,9121	0,7658
Tempo de embebição (min)	3,78	6,65	9,05
Tempo de precipitação (min)	120	150	150
Tempo final do esc. sup. (min)	128,98	161,80	152,62
Taxa de pico do esc. superficial (mm/h)	75,88	77,05	70,74
Tempo da taxa de pico do esc. superficial (min)	120	80	95

SS1: solo com uso do simulador de chuva – 1ª parcela, SS2: solo com uso do simulador de chuva – 2ª parcela e SS3: solo com uso do simulador de chuva – 3ª parcela.

Os coeficientes de escoamento superficial para essa superfície estiveram entre 0,77 e 0,91. Em solo exposto Bruno (2011) observou valor médio de 0,58 e Moura (2005) apresenta valores entre 0,52 e 0,63. Sendo os valores encontrados superiores aos observados na literatura. A menor taxa de pico do escoamento superficial foi vista em SS3 que também teve o menor coeficiente de escoamento superficial (0,7658) e o maior de tempo de embebição de todos. Na figura 34 são apresentados os gráficos com as taxas de escoamento superficial, infiltração observada, drenagem de fundo e intensidade de precipitação, para as três simulações com solo.

Figura 34. Gráficos com as taxas de escoamento superficial, infiltração observada, drenagem de fundo e intensidade de precipitação para simulações de chuva nas parcelas de solo (SS1, SS2 e SS3).



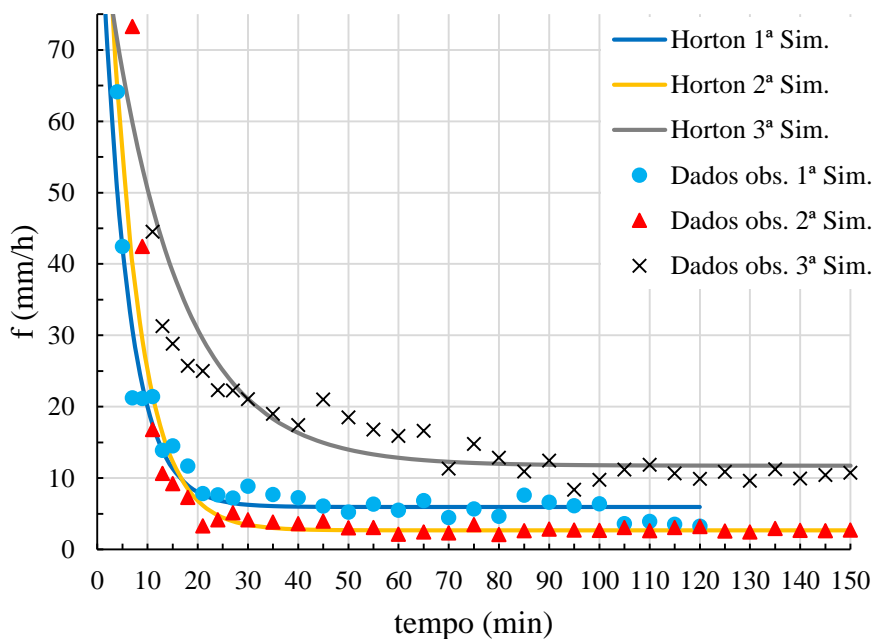
Nos gráficos é possível observar o comportamento das taxas de infiltração dos solos expostos em relação ao tempo de infiltração, mostrando que no início das simulações a taxa de infiltração é constante e alta em virtude da parcela de solo não estar saturada, e à medida que ia passando o tempo a infiltração diminuía até atingir um valor constante, a taxa de infiltração estável (TIE).

No gráfico SS2 é possível observar uma queda mais rápida da taxa de infiltração após o término do tempo de embebição em relação às outras simulações. O menor tempo para se atingir a taxa de pico do escoamento superficial na segunda simulação ajudou a entender porque o valor dessa taxa foi a maior entre as observadas. Após o encerramento da precipitação, a parcela SS2 foi a que mais tempo levou para findar o escoamento superficial, cerca de 11,8 minutos.

Na curva da taxa de infiltração observada para o gráfico SS3 é possível ver uma queda gradual da infiltração que vai se estabilizando com o avanço do tempo de precipitação. Essa estabilização da infiltração começa a partir dos 95 minutos de início da chuva. Essa parcela foi a que apresentou o maior tempo de embebição e a menor taxa de pico do escoamento superficial, ajudando a entender o motivo de ter tido o menor coeficiente de escoamento superficial entre as parcelas.

A seguir, são apresentados os ajustes do modelo de Horton aos dados observados nas três parcelas de solo com o uso de simulador.

Figura 35. Ajuste do modelo de Horton aos dados observados para as simulações com solo usando simulador.



Na tabela 14 são apresentados as equações e os índices estatísticos  $R^2$ , CA e CMR calculados. A equação para terceira simulação superestimou levemente a taxa de infiltração

(CMR<0), enquanto que as outras equações subestimaram a taxa (CMR>0). O CA da equação de ajuste para SS3 foi o que mais próximo esteve da unidade, o que indica melhor ajuste dos dados observados ao modelo de Horton, algo que é reforçado pelo maior valor de R<sup>2</sup> visto para essa equação.

Tabela 14. Equações e índices estatísticos calculados para as três simulações com solo usando simulador.

Simulação	Equação	R <sup>2</sup>	CA	CMR
SS1	$f(t) = 5,94 + (100,13 - 5,94)e^{-11,45t}$	0,93	1,21	0,03
SS2	$f(t) = 2,69 + (123,91 - 2,69)e^{-10,13t}$	0,87	1,39	0,14
SS3	$f(t) = 11,72 + (90,71 - 11,72)e^{-4,27t}$	0,93	0,97	-0,06

As médias da taxa de infiltração estável e seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação podem ser visto na tabela 15.

Tabela 15. Valores da taxa de infiltração estável (TIE) observada para as simulações com solo usando simulador.

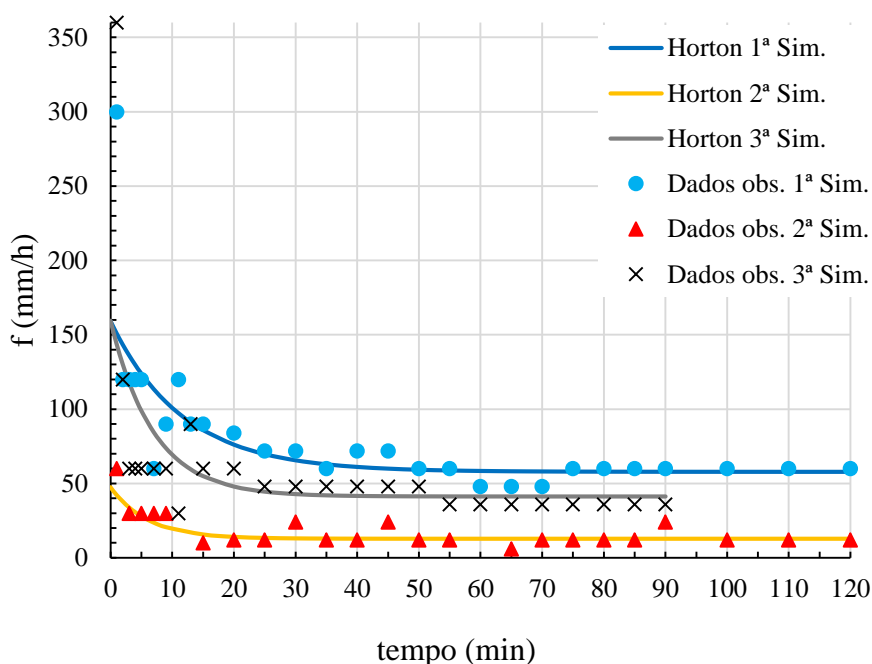
Simulação	Taxa de infiltração estável (TIE)		
	Média* (mm/h)	Desvio padrão* (mm/h)	Coefficiente de variação* (%)
SS1	3,56	0,35	9,85
SS2	2,64	0,04	1,39
SS3	10,36	0,41	3,93

\*Média, desvio padrão e coeficiente de variação calculados para os três últimos valores de taxa de infiltração observados.

Bruno (2011) estudando solo exposto encontrou taxa de infiltração estável de 29,15 mm/h, enquanto que Silva (2006) encontrou valor próximo a 30 mm/h. As taxas de infiltração estável foram 3,56 (SS1), 2,64 (SS2) e 10,36 (SS3) mm/h. Esses valores ficaram abaixo daqueles observados pelos autores citados, algo que já esperado em decorrência dos valores dos coeficientes de escoamento superficial (C) para essa superfície. As TIEs apresentaram valores baixos de coeficientes de variação segundo a classificação de Pimentel-Gomes (2009).

Os ajustes do modelo de Horton aos dados observados nas três parcelas de solo com o uso de anel concêntrico são vistos na figura 36.

Figura 36. Ajuste do modelo de Horton aos dados observados para as simulações com solo usando anel.



Na tabela 16 são apresentados as equações e os índices estatísticos  $R^2$ , CA e CMR calculados.

Tabela 16. Equações e índices estatísticos calculados para as três simulações com solo usando anel concêntrico.

Simulação	Equação	$R^2$	CA	CMR
SA1	$f(t) = 57,59 + (159,17 - 57,59)e^{-5,14t}$	0,57	2,46	0,03
SA2	$f(t) = 12,77 + (47,49 - 12,77)e^{-9,95t}$	0,70	2,14	0,10
SA3	$f(t) = 41,22 + (159,44 - 41,22)e^{-8,61t}$	0,43	4,08	0,02

SA1: solo com uso de anel – 1ª parcela, SA2: solo com uso de anel – 2ª parcela e SA3: solo com uso de anel – 3ª parcela.

Esses ensaios foram os que apresentam menores coeficientes de determinação, um dos motivos é que o modelo de Horton é relativamente inadequado para representar um decréscimo muito rápido da taxa de infiltração segundo Cunha et al. (2009). Isso foi corroborado pelos valores de CA, que se distanciaram da unidade, indicando que o modelo não apresentou um bom ajuste aos dados observados. O modelo de Horton, em geral, subestimou a taxa de infiltração conforme pode ser visto pelos valores positivos do CMR.

As TIEs para SA1, SA2 e SA3 foram 60, 12 e 36 mm/h, respectivamente. Os valores do desvio padrão e do coeficiente de variação foram nulos, uma vez que os três últimos valores usados para calcular a média foram idênticos. Mancuso et al.(2014), ao estudar infiltração em solos expostos com uso anel de infiltração, encontraram uma taxa de infiltração estável máxima

de 46,54 mm/h e mínima de 8,05 mm/h. Os valores observados se aproximam das TIE obtidas por esse autor. As taxas de infiltração estável alcançadas com o anel de infiltração são todas superiores àquelas encontradas com o simulador de chuva, e isso já era esperado, pois os anéis tendem a superestimar a TIE (COSTA et al., 1999; POTT; DE MARIA, 2003).

Levien, Van Lier e Alves (2000) mostraram que a taxa de infiltração estável encontrada com o uso de anel foi de 5 a 10 vezes superior ao valor visto com a utilização do simulador. Isso também foi visto nos ensaios realizados, onde a menor TIE encontrada com o uso de anel (12 mm/h) foi cerca de cinco vezes o valor da menor TIE registrada com uso de simulador (2,64 mm/h).

Essa diferença entre os valores observados nos dois métodos indica que essa diminuição da taxa de infiltração estável deve estar relacionada à uma condição de superfície. Nos anéis, a carga hidráulica sobre a superfície faz com que a infiltração ocorra na taxa máxima que o solo permite, sendo restringida apenas pelas características do próprio solo, o que favorece altas infiltrações. No simulador de chuvas não há uma coluna de água sobre a superfície do solo, ficando a superfície exposta ao impacto das gotas da chuva e do escoamento superficial, diminuindo a infiltração (COSTA et al., 1999).

Para os ensaios com simulador a taxa de infiltração estável apresentou valores predominantes de solos com TIE média, enquanto as simulações com anel apresentaram valores predominantes de solos com TIE muito alta, seguindo a classificação de Bernardo (1989).

As TIEs observadas para o solo com o uso de simulador apresentam valores que se encaixam tanto na textura franco argilosa (2,64 e 3,56 mm/h), quanto na franco arenosa argilosa (10,36 mm/h) conforme classificação de Bernardo, Soares e Mantovani (2008). Já para as simulações com anel estariam dentro daquelas vistas em solos de textura franco arenosa (36 e 60 mm/h) e franco arenosa argilosa (12 mm/h). Logo, pode-se afirmar que os valores de TIE predominantes foram condizentes com a textura do solo exposto em estudo, que apresenta textura franco arenosa argilosa.

Silva (2018) encontrou um valor de 22,57 mm/h para condutividade hidráulica saturada do solo da área Estação Experimental da UFT. Segundo Brandão, Pruski e Silva (2003) a taxa de infiltração se aproxima de um valor constante (TIE), mas frequentemente ela é menor que a condutividade hidráulica em solo saturado. Essa diferença acontece em virtude da presença de ar aprisionado no solo e da incompleta saturação do solo em condições de campo. Nas simulações como solo exposto, as taxas de infiltração estável encontradas com simulador



estiveram abaixo da condutividade hidráulica saturada e duas das três TIEs obtidas com anel estiveram acima desse valor.

Durante as simulações verificou-se que o solo sofreu influência direta do impacto das gotas de chuva. Nos tempos iniciais das simulações, essas gotas causaram desagregação da superfície do solo e as partículas resultantes foram transportadas para o balde coletor do escoamento superficial, o que refletia na alta turbidez da água.

Com o passar do tempo o volume escoado se tornou maior e a turbidez diminuiu. Isto pode ser justificado pelo impacto das gotas de chuva no solo descoberto, que gera o processo de selamento superficial, algo também relatado por Alves Sobrinho (2015). De acordo com Valentin e Bresson (1992) citado por Brandão et al. (2006), esse selamento acontece porque com o impacto das gotas, as partículas do solo são rearranjadas e consolidadas em uma estrutura superficial coesa, cuja espessura pode variar de 0,1 mm até valores superiores a 50 mm. Panachuki (2003) afirma que a magnitude da infiltração pode ser severamente reduzida pela formação ou presença desse selamento superficial. Em foto retirada no dia seguinte a simulação é possível observar a formação de crostas sobre a superfície do solo (figura 37).

Figura 37. Formação de crostas na superfície do solo.



É importante destacar que a formação de crosta na superfície do solo não provém apenas do impacto das gotas, mas também de fatores como textura do solo, ausência de vegetação, compactação mecânica e manejo do solo, conforme apontam Levien, Van Lier e Alves (2000).

A região escolhida para as simulações de chuva sobre o solo é uma área antropizada sem vegetação, próxima ao alambrado que divide o terreno da UFT e a Subestação de Energia. No período que foram feitos os preparativos para as simulações observou-se a passagem de pedestres e alguns veículos pelo local, incluindo caminhonetes e um trator. Não havia vegetação próxima aos locais escolhidos. O solo estava aparentemente compacto, algo que foi notado pela

dificuldade de se cravar tanto os anéis concêntricos quanto a forma para coleta do escoamento superficial no solo.

Araújo, Goedert e Lacerda (2007) observaram que as áreas com maior intensidade de uso do solo apresentam maiores densidades e menor porosidade total, em especial na camada superficial (0 - 5 cm). Como foi visto na caracterização do solo a densidade aparente média de  $1,49 \text{ g/cm}^3$  está próxima a densidades vistas na literatura, e a porosidade total se aproxima de valores de solos que já passaram por algum tipo de uso. Mancuso et al. (2014) ao estudar solo nessas condições verificaram que menores taxas de infiltração estável estão associadas a maiores densidades aparente, apresentando indícios de movimento de água mais lento e dificuldade de drenagem no solo. Estes fatores ajudam a explicar os baixos valores de TIE encontrados para esse solo de textura franco argilosa arenosa mesmo com o uso de anel.

#### **5.2.4 Visão geral das superfícies**

No quesito coeficiente de escoamento superficial, o BM alcançou o maior valor médio de todos, seguido pelo solo exposto e pelo BCP, onde nesse último menos de 1% do que choveu se tornou escoamento superficial. Os valores médios dos coeficientes de escoamento superficial para o BCP mostram que esses blocos são favoráveis à redução da geração do escoamento superficial. A diferença dos valores de C entre os dois blocos estudados pode estar relacionada com a própria estrutura dos blocos, onde no BM a água infiltra quase que totalmente pelas juntas, enquanto no BCP a passagem de água se dá por pela estrutura do próprio bloco e também pelas juntas.

O BM apresentou o menor valor médio de tempo de embebição (3,63 minutos), seguido pelo solo exposto (6,49 minutos) e pelo BCP (7,92 minutos). O maior tempo de embebição para o BCP indica que numa situação real de chuva, a água leva mais tempo para começar a gerar o escoamento superficial nesse tipo de superfície.

A superfície que alcançou a maior taxa de infiltração estável foi o BCP e o BM, a menor. Como foi levantado na revisão bibliográfica tanto o BCP quanto o BM são classificados como pavimentos permeáveis e como tal, deveriam favorecer a infiltração. A colmatação das juntas fez com que o BM deixasse de exercer essa funcionalidade com sucesso, e isto ficou bem visível pelo fato dessa superfície ter apresentado, em geral, taxas de infiltração menores do que um solo exposto antropizado. Isso mostra que se deve tomar cuidado ao adotar os blocos maciços como uma medida mitigadora no controle do escoamento superficial sem que haja uma manutenção periódica para garantir boas taxas de infiltração.

Nos testes com BM foi visto um aumento repentino da taxa escoamento superficial. Isso é um indicativo da baixa capacidade de infiltração desse bloco. Nas simulações com esses blocos quase toda precipitação gerou escoamento superficial, com acréscimo de até 23% no coeficiente de escoamento superficial em comparação com as simulações em solo exposto, indicando um maior potencial de crescimento das enchentes urbanas em função de um uso intenso deste tipo de bloco.

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 Simulador de chuva

- O simulador de chuvas permite gerar precipitações com intensidades dentro do tempo de retorno estabelecido para microdrenagem pelo Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas – TO com chuvas de 10, 30 e 60 minutos.
- O bico 1/2 HH-36SQ apresentou valores de CUC acima de 90% e foi escolhido para construção do simulador de chuvas.
- A pressão de trabalho escolhida foi a de 0,5 kgf/cm<sup>2</sup>, uma vez que das pressões estudadas essa foi a que apresentou o melhor CUC médio.
- O modelo polinomial ajustado aos de intensidade real da precipitação apresentou um bom coeficiente de determinação, acima de 0,95.
- O diâmetro médio das gotas esteve bem próximo aos valores encontrados por outros autores para pressões de trabalho parecidas.
- A energia cinética gerada pelo simulador de chuva correspondeu a 90% de uma chuva natural.

### 6.2 Simulações de chuvas sobre as superfícies

- Dentre as superfícies estudadas, a que apresentou melhor comportamento no controle do escoamento superficial foi o BCP, seguida do solo exposto e do BM.
- Constatou-se que nem sempre considerar o BM como uma alternativa que favorece áreas de infiltração é uma alternativa acertada, porque como foi visto, se suas juntas estiverem seladas a infiltração nesses blocos pode ser menor que aquela vista em solos expostos.
- As taxas de infiltração estável obtidas com o auxílio de anel de infiltração foram maiores que aquelas observadas com o uso do simulador de chuvas, algo que já relatado na literatura.
- A compactação da superfície do solo pelo impacto das gotas da chuva pode ter influenciado diretamente nos valores das TIEs reduzidos.
- A densidade aparente do solo também dá indícios que o solo já estava parcialmente compactado antes das simulações, o que também pode ter influenciado nos baixos valores das TIEs encontrados.

- O modelo de Horton apresentou melhor ajuste para os dados observados nos ensaios com solo exposto e uso do simulador.

## **7 RECOMENDAÇÕES**

### **7.1 Simulador de chuvas**

- Construir um coletor para o excesso de água que se perde durante a realização das simulações em virtude do raio de molhamento do aspersor.
- Fazer o teste da farinha para outras pressões de operação do simulador para verificar o comportamento do diâmetro da gota e da energia cinética em outros cenários.
- Testar uma válvula reguladora de pressão para evitar que ocorra oscilações de vazão da bomba e isso influencie nos resultados.
- Fazer sempre o teste de calibração de manômetro após a sua compra.
- Realizar simulações com as válvulas solenoides abrindo e fechando em milésimos de segundo para verificar as intensidades de precipitações que serão produzidas.

### **7.2 Simulações de chuvas sobre as superfícies**

- Realizar simulações de chuvas com maiores intensidades e diferentes tempos de duração para verificar o comportamento destas superfícies em cenários diferentes.
- Usar sensores de umidade para verificar os valores desta variável antes, durante e depois das simulações de chuva e analisar sua influência no estudo da VIB.
- Usar outros modelos de infiltração na modelagem dos dados observados e fazer a comparação entre os resultados obtidos.
- Automatizar a leitura dos volumes de água escoado e drenado de fundo para melhor a dinâmica dos ensaios e diminuir possíveis perdas com derramamento de água ou erros de leitura.
- Desenvolver uma forma com uma calha coletora de escoamento superficial com uma maior declividade e aumentar o diâmetro do tubo de saída para evitar entupimentos com matéria orgânica e partículas sólidas.
- Fazer a remoção dos blocos maciços e a limpeza das juntas para verificar o comportamento da taxa de infiltração após essas ações.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRANTES, J. R. C. B.; LIMA, J. L. M. P. DE; MONTENEGRO, A. A. A. Desempenho da modelagem cinemática do escoamento superficial para chuvas intermitentes em solos com cobertura morta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 166–172, 2015.
- ALBUQUERQUE, J. A.; CASSOL, E. A.; REINERT, D. J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 141–151, 2000.
- ALESSI, F.; KOKOT, P. J.; GOMES, J. Comparação do escoamento superficial gerado por pavimentos permeáveis em blocos de concreto e asfalto poroso. **Da vanci**, v. 3, n. 1, p. 139–156, 2006.
- ALSUBIH, M. et al. **Experimental study on the hydrological performance of a permeable pavement**. 8th International Conference on planning and technologies for sustainable management of Water in the City. **Anais...Lyon: NOVATECH 2013**, 2013Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1573062X.2016.1176221>>
- ALVES, S. N. R. **Efeito residual de herbicidas aplicados em pré-emergência em diferentes condições de restrição hídrica no solo na cultura da cana- Samuel Neves Rodrigues Alves Piracicaba**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2010.
- ALVES SOBRINHO, T. **Caracterização da infiltração da água e do escoamento superficial na área urbana de Campo Grande - MSCampo Grande**, 2015.
- ALVES SOBRINHO, T.; FERREIRA, P. A.; PRUSKI, F. F. Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 337–344, 2002.
- ANDERSEN, C. T.; FOSTER, I. D. L.; PRATT, C. J. The role of urban surfaces (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation: development of a laboratory simulation experiment. **Hydrological Processes**, v. 13, n. 4, p. 597–609, mar. 1999.
- AOKI, A. M.; SERENO, R. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. **Agriscientia**, v. XXIII, n. 1, p. 23–31, 2006.
- ARAÚJO, C. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 21–29, 2000.
- ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1099–1108, out. 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. **ABNT**, p. 25, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. **ABNT**, p. 8, 2016.
- BENEDICT, M. A.; MCMAHON, E. T. Green Infrastructure. In: **Green Cities: An A-to-Z Guide**. 2455 Teller Road, Thousand Oaks California 91320 United States: SAGE Publications,

Inc., 2000. v. Mayp. 4–7.

BENITO, E. et al. Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvia de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión del suelo. **Revista de Xeoloxía Galega e do Hercínico Peninsular**, v. 26, n. 4, p. 211–220, 2001.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 5ª ed. Viçosa: UFV, 1989.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, C. **Manual de irrigação**. 8ª ed. Viçosa: UFV, 2008.

BERTOL, I.; BERTOL, C.; BARBOSA, F. T. Simulador de chuva tipo empuxo com braços movidos hidráulicamente: Fabricação e calibração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1905–1910, 2012.

BRANDÃO, V. DOS S. et al. Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 13–22, fev. 2006.

BRANDÃO, V. DOS S.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. **Infiltração da água no solo**. 2ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2003.

BRODIE, I.; ROSEWELL, C. Theoretical relationships between rainfall intensity and kinetic energy variants associated with stormwater particle washoff. **Journal of Hydrology**, v. 340, n. 1, p. 40–47, 2007.

BRUNO, L. O. **Avaliação Experimental de Superfícies na redução do Escoamento Superficial Direto**. Cuiabá: Universidade Federal de Mato Grosso, 2011.

CAMPOS, A. R. et al. Estimate of intense rainfall equation parameters for rainfall stations of the Paraíba State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**, v. 47, n. 1, p. 15–21, 2017.

CARVALHO, C. F. G. **Estudo de pavimentos permeáveis em zonas urbanas: Avaliação da sua eficiência na redução do escoamento superficial**. Covilhã: Universidade da Beira Interior, 1 jul. 2015.

CARVALHO, D. F. DE et al. Perdas de água e solo sob diferentes padrões de chuva simulada e condições de cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 4, p. 708–717, 2012a.

CARVALHO, D. F. DE et al. Water erosion and soil water infiltration in different stages of corn development and tillage systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 11, p. 1072–1078, 2015.

CARVALHO, J. C. B. DE. **Condição dos agregados e da constituição microbiológica de solos submetidos a diferentes usos e manejos agrícolas em Selvíria (MS)**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2006.

CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. DE F. N.; CARVALHO, E. T. L. **Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais**. Série Geot ed. Brasília: Universidade de Brasília, 2012.

CARVALHO, M. D. F. et al. Avaliação do Funcionamento de um Simulador de Chuva Pelo Método da Farinha. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 115–124, 2012b.

CASTRO-FRESNO, D. et al. Sustainable Drainage Practices in Spain, Specially Focused on Pervious Pavements. **Water**, v. 5, n. 1, p. 67–93, 23 jan. 2013.



CASTRO, M. H. DE. **Pavimentos permeáveis para drenagem de água e diminuição do escoamento superficial**. Palmas: Universidade Federal do Tocantins, 2015.

CASTRO, T. Q. DE. **Avaliação do desempenho de pavimentos permeáveis**. [s.l.] Universidade Federal de Goiás, 2011.

CHARLESWORTH, S.; WARWICK, F.; LASHFORD, C. Decision-Making and Sustainable Drainage: Design and Scale. **Sustainability**, v. 8, n. 8, p. 782, 10 ago. 2016.

CHOUKSEY, A. et al. Hydrological modelling using a rainfall simulator over an experimental hillslope plot. **Hydrology**, v. 4, n. 1, p. 17, 2 mar. 2017.

CHRISTIANSEN, J. E. Irrigation by Sprinkling. **California Agricultural Experiment Station Bulletin**, 1942.

COELHO, R. D.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N. Relações Água-Solo-Planta-Atmosfera Infiltração Da Água No Solo: Parte I Infiltrômetro De Anéis Versus Infiltrômetro De Aspersiones. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 137–141, 2000.

COFFMAN, L. **Low-Impact Development Design: A New Paradigm for Stormwater Management Mimicking and Restoring the Natural Hydrologic Regime An Alternative Stormwater** Prince George's County, 2000. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.199.2586>>

COMMANDEUR, P. R. Soil erosion studies using rainfall simulation on forest harvested areas in British Columbia. **Erosion, Debris Flows and Environment In Mountain Regions (Proceedings of the Chengdu Symposium)**, n. 209, p. 21–28, 1992.

COSTA, É. L. DA et al. Infiltração de água em solo, determinada por simulador de chuvas e pelo método dos anéis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 131–134, 1999.

COVERT, A.; JORDAN, P. A portable rainfall simulator: Techniques for understanding the effects of rainfall on soil erodibility. **Watershed Management Bulletin**, v. 13, n. 1, p. 5–9, 2009.

CUI, X. et al. Improvement of Permeability Measurement Precision of Pervious Concrete. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 43, n. 4, p. 812–819, 12 jul. 2015.

CUNHA, J. L. X. L. et al. Velocidade de infiltração da água em um latossolo amarelo submetido ao sistema de manejo plantio direto. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 1, p. 199–205, 2009.

DALRI, A. B. et al. Influência da aplicação de vinhaça na capacidade de Infiltração de um solo de textura franco arenosa. **Irriga**, v. 15, n. 4, p. 344–352, 2010.

EGITO, T. B. DO. **Análise multicritério sobre estratégias de uso e conservação da água no meio urbano**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

ELLIOTT, A.; TROWSDALE, S. A review of models for low impact urban stormwater drainage. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 3, p. 394–405, mar. 2007.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1997.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Storm Water Technology Fact Sheet - Porous Pavement. **National Service Center for Environmental**

**Publications (NSCEP)**, p. 7, 1999.

FERNÁNDEZ-GÁLVEZ, J.; BARAHONA, E.; MINGORANCE, M. D. Measurement of infiltration in small field plots by a portable rainfall simulator: Application to trace-element mobility. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 191, n. 1–4, p. 257–264, 2008.

GOOGLE EARTH. **Google Earth ProGoogle**, 2017. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-PT/earth/>>. Acesso em: 10 ago. 2017

GUEDES, C. DE S. **Avaliação do desempenho hidrológico de pavimentos permeáveis**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2015.

GUEDES, C. DE S.; SILVA, E. P. DA; SIQUEIRA, E. Q. DE. **Análise do coeficiente de escoamento do pavimento permeável do tipo paver**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...**Bento Gonçalves: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013

HENNELLY, B. SuDS – Principles and Drivers. **South Dublin County Council**, p. 4, 2005.

HERNGREN, L.; GOONETILLEKE, A.; AYOKO, G. **Investigation of urban water quality using artificial rainfall**. Proceedings of the Water Environment Federation: Watershed. **Anais...**Dearborn, Michigan, USA: 1 jan. 2004Disponível em: <<http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=1938-6478&volume=2004&issue=4&spage=1169>>

HÖLTZ, F. DA C. Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, v. 1, p. 118, 2011.

HUDSON, N. W. **The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion: with particular reference to Southern Rhodesia**. [s.l.] University of Cape Town, 1965.

IBRAHIM, A. et al. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 524–529, 2014.

JAYASOORIYA, V. M.; NG, A. W. M. Tools for Modeling of Stormwater Management and Economics of Green Infrastructure Practices: a Review. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 225, n. 8, p. 2055, 21 ago. 2014.

JÚNIOR, S. F. S.; SIQUEIRA, E. Q. **Development and calibration of a rainfall simulator for urban hydrology research**. 12th International Conference on Urban Drainage, 11-16 September 2011. **Anais...**2011

KEVERN, J. T. Evaluating Permeability and Infiltration Requirements for Pervious Concrete. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 43, n. 3, p. 544–553, maio 2015.

KINNER, D. A; MOODY, J. A. Infiltration and runoff measurements on steep burned hillslopes using a rainfall simulator with variable rain intensities. n. Report 2007–5211, p. 64, 2008.

KOBIYAMA, M. et al. **Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos**. 1ª ed. Curitiba, Paraná: Organic Trading, 2006.

LAWS, J. O. Measurements of the fall-velocities of water-drops and raindrops. **Soil Conservation Service**, p. 60, 1941.

LEMING, M. L.; MALCOM, H. R.; TENNIS, P. D. **Hydrologic Design of Pervious Concrete**. [s.l.] Portland Cement Association, 2007.

- LEVIEN, R.; VAN LIER, Q. DE J.; ALVES, A. G. C. Influência da crosta superficial nas taxas de infiltração de água medidas com simulador de chuva e anéis concêntricos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 479–486, set. 2000.
- LIMA, C. A. DE. **Perdas de solo, água e nutrientes em cultivo de mandioca no Recôncavo da Bahia**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2013.
- LOCH, R. J. et al. A multi-purpose rainfall simulator for field infiltration and erosion studies. **Soil Research**, v. 39, n. 3, p. 599–610, 24 abr. 2001.
- MANCUSO, M. A. et al. Características da taxa de infiltração e densidade do solo em distintos tipos de cobertura de solo em zona urbana. **Revista Monografias Ambientais - REMOA**, v. 1, n. 1, p. 37, 2014.
- MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. **Pavimento Intertravado Permeável - Melhores Práticas Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP)**. São Paulo: ABCP, 2010.
- MENEZES, P. L. DE et al. Artificial neural network model for simulation of water distribution in sprinkle irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 19, n. 9, p. 817–822, 2015.
- MIERZWA, J. C. et al. Águas Pluviais: Método De Cálculo Do Reservatório E Conceitos Para Um Aproveitamento Adequado. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 4, n. 1, p. 29–37, 2007.
- MIGUNTANNA, N. S. **Determining a set of surrogate parameters to evaluate urban stormwater quality**. [s.l.] Queensland University of Technology, 2009.
- 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, 2001.
- MORALES-TORRES, A. et al. Decision Support Tool for energy-efficient, sustainable and integrated urban stormwater management. **Environmental Modelling & Software**, v. 84, p. 518–528, out. 2016.
- MOURA, T. A. M. **Estudo experimental de superfícies permeáveis para o controle do escoamento superficial em ambientes urbanos**. Brasília: Universidade de Brasília, 2005.
- NAMPULÁ, J. L. C. et al. Diseño y calibración de un simulador automático de lluvia. **Espacio I+D, Innovación más Desarrollo**, v. 5, n. 12, p. 23–36, 2016.
- NETO, P. DE S. G. **Telhados verdes associados com sistema de aproveitamento de água de chuva: Projeto de dois protótipos para futuros estudos sobre esta técnica compensatória em drenagem urbana e prática sustentável na Construção Civil**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- NICHOLS, P. W. B.; LUCKE, T.; DIERKES, C. Comparing two methods of determining infiltration rates of permeable interlocking concrete pavers. **Water (Switzerland)**, v. 6, n. 8, p. 2353–2366, 2014.
- OLIVEIRA, F. C. DE et al. **Avaliação de um simulador de chuva de intensidade variável**. XIII JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO 2013 – UFRPE. **Anais**. 2013.
- OLIVEIRA, M. B. DE. **Análise do desempenho de equações de infiltração e de métodos de determinação da capacidade de campo para solos em uma bacia hidrográfica de São José de Ubá-RJ**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

- PAIGE, G. B. et al. The walnut culch rainfall simulator: A computer-controlled variable intensity rainfall simulator. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n. 1, p. 25–31, 2003.
- PAIXÃO, F. J. R. DA et al. Ajuste da curva de infiltração por meio de diferentes modelos empíricos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 2, n. 1, p. 107–112, 2009.
- PANACHUKI, E. **Infiltração de água no solo e erosão hídrica, sob chuva simulada, em sistemas de integração agricultura- pecuária**. Dourados: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL, 2003.
- PEREIRA, K. K.; BARBOSA, M. P. **Desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil da região de campinas**. V Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. **Anais...2015**
- PÉREZ-LATORRE, F. J.; DE CASTRO, L.; DELGADO, A. A comparison of two variable intensity rainfall simulators for runoff studies. **Soil and Tillage Research**, v. 107, n. 1, p. 11–16, 2010.
- PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. 15. ed. Piracicaba: Fealq, 2009.
- POMPÊO, C. A. Drenagem urbana sustentável. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 1, p. 15–23, 2000.
- POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 1, p. 19–27, 2003.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE PALMAS. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas - TO: Drenagem Urbana**. Palmas: PREFEITURA MUNICIPAL DE PALMAS, 2014. v. III
- PREFEITURA MUNICIPAL DE PALMAS. **Solos do município de Palmas - TO**. Disponível em: <<http://geo.palmas.to.gov.br/>>. Acesso em: 7 nov. 2018.
- REIS, S. S. 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**. Poços de Caldas: Universidade Federal de Alfenas, 2015.
- RESCK, D. V. S. Parâmetros físicos dos solos da região dos Cerrados. **EMBRAPA-CPAC. Boletim de pesquisa.**, n. 2, p. 17, 1981.
- RESCK, D. V. S.; PEREIRA, J.; SILVA, J. E. Dinâmica da matéria orgânica na região dos Cerrados. **EMBRAPA-CPAC. Documentos.**, n. 36, p. 22, 1991.
- RIBEIRO, B. T. **Energia cinética de gotas de chuva simulada e energia ultra-sônica na desagregação de um cambissolo**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006.
- RIBEIRO, B. T. et al. **Calibração e uso de minissimulador de chuva para estudos de erosão e poluição do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2007.
- RODRIGUES, G. B.; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 73–80, fev. 2007.
- ROTTA, C. M. DOS S.; ZUQUETTE, L. V. Erosion feature reclamation in urban areas: typical unsuccessful examples from Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 72, n. 2, p. 535–555,

10 jul. 2014.

SANTANA, M. S. R. DE et al. **Avaliação do efeito da cobertura morta na erosão hídrica de um argissolo amarelo sob condições de chuva simulada**. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...**Brasília: 2015

SANTOS, C. G. DOS. **Desenvolvimento de um sistema de controle automático para simulador de chuvas**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 2015.

SANTOS, L. L. DOS. Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. **RBGF-Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 203, n. 03, p. 1–19, 2009.

SANTOS, P. S. J. DOS. **Estudo da sistemicidade e tenacidade de epoxiconazol , piraclostrobina e fluxapirroxade em plantas de soja e videira**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2016.

SANTOS, T. E. M. DOS. **Avaliação de técnicas de conservação de água e solo em bacia experimental do semi-árido pernambucano**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2006.

SARASWAT, C.; KUMAR, P.; MISHRA, B. K. Assessment of stormwater runoff management practices and governance under climate change and urbanization: An analysis of Bangkok, Hanoi and Tokyo. **Environmental Science & Policy**, v. 64, p. 101–117, 2016.

SILVA, G. B. L. DA. Avaliação experimental sobre a eficiência de superfícies permeáveis com vistas ao controle do escoamento superficial em áreas. p. 199, 2006.

SILVA, R. A. E. **Impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade e pegada hídrica da soja cultivada na região do Matopiba**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

SOUSA JÚNIOR, S. F. DE. **Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuva para estudos ambientais**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2011.

SOUZA, M. D. **Infiltração de água em latossolo roxo distrófico submetido a diferentes manejos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985.

SPOHR, R. et al. Desenvolvimento e validação de um simulador de chuvas portátil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 2, p. 411–417, 2015.

SPRAYING SYSTEMS COMPANY. Catálogo de Bicos e Acessórios de Pulverização Industrial. . 2016, p. 398.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 850–859, 2015.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 5–27, 2002a.

TUCCI, C. E. M. **Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos**. Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Anais...**Brasília: ANA – Agência Nacional de Águas para a Câmara Temática sobre Recursos Hídricos do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2002b

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas na América do Sul**. 1ª ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

VAN DIJK, A. I. J. .; BRUIJNZEEL, L. .; ROSEWELL, C. . Rainfall intensity–kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. **Journal of Hydrology**, v. 261, n. 1–4, p. 1–23, 15 abr. 2002.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009.

WARWICK, F.; CHARLESWORTH, S. Sustainable drainage devices for carbon mitigation. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 24, n. 1, p. 123–136, 28 dez. 2012.

WEBER, J. F. Parameter estimation for Philip’s infiltration model in pervious areas of Corboda city, Argentina. **Aqua-LAC**, v. Vol. 7, n. Nº 1, p. 39–48, 2015.

WEBER, J. F.; PAOLI, H. I.; APESTEGUI, L. Microsimulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos. **Revista Tecnología y Ciencia**, v. 18, n. 9, p. 47–53, 2010.

YOUNG, D.; VAN SETERS, T.; GRAHAM, C. **Evaluation of Underground Stormwater Infiltration Systems**. Toronto, Ontario: Toronto and Region Conservation Authority, 2013.

## 9 ANEXOS

### 9.1 Orçamento

Quadro 3. Orçamento do simulador.

USO	DESCRIÇÃO DO PRODUTO/SERVIÇO	UNIDADE DE MEDIDA	QTD.	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
<b>ACESSÓRIOS DIVERSOS</b>	MANÔMETRO FAMABRAS FSIG 62/2 ANG ESC 150 PSI X kgf/cm <sup>2</sup>	UNIDADE	1	R\$ 100,00	R\$ 100,00
	FRETE MANÔMETRO	UNIDADE	1	R\$ 45,00	R\$ 45,00
	REDUÇÃO MACHO/FÊMEA ½" X ¼"	UNIDADE	1	R\$ 6,09	R\$ 6,09
	ADAPTADOR SOLDÁVEL ¾"	UNIDADE	1	R\$ 1,28	R\$ 1,28
	REGISTRO GAVETA ½" DULONG	UNIDADE	1	R\$ 44,07	R\$ 44,07
	FILTRO PARA IRRIGAÇÃO ¾" TELA INOX 120 MESH IRRITEC	UNIDADE	1	R\$ 28,32	R\$ 28,32
	PLUG ROSCÁVEL ½"	UNIDADE	1	R\$ 1,00	R\$ 1,00
	TE ROSCÁVEL ½"	UNIDADE	3	R\$ 2,13	R\$ 6,39
	NIPLE ROSCA ½"	UNIDADE	2	R\$ 0,59	R\$ 1,18
	ABRAÇADEIRA FITA 09 mm 13-19	UNIDADE	4	R\$ 1,19	R\$ 4,76
	ABRAÇADEIRA FITA 09 mm 19-27	UNIDADE	7	R\$ 1,22	R\$ 8,54
	TUBO SOLDÁVEL 40 mm PLASTILIT	METRO	38	R\$ 4,77	R\$ 181,26
	TUBO SOLDÁVEL PVC ½"	METRO	1	R\$ 3,00	R\$ 3,00
	PISCINA 1500 LITROS INFANTIL - MOR	UNIDADE	1	R\$ 144,80	R\$ 144,80
	CAIXA D'ÁGUA 100 LITROS FORTLEV	UNIDADE	1	R\$ 117,15	R\$ 117,15
	CAIXA D'ÁGUA 250 LITROS FORTLEV	UNIDADE	1	R\$ 175,00	R\$ 175,00
	TORNEIRA BOIA COM HASTE METÁLICA ¾"	UNIDADE	1	R\$ 9,50	R\$ 9,50
	MANGUEIRA TRANSPARENTE CRISTAL 250 PSI ¾"	METRO	2	R\$ 7,99	R\$ 15,98
	MANGUEIRA PARA JARDIM ½"	METRO	25	R\$ 1,99	R\$ 49,75
	TORNEIRA HERC PARA JARDIM ¾"	UNIDADE	1	R\$ 2,64	R\$ 2,64

	ABRAÇADEIRA TIPO "U" ¾"	UNIDADE	1	R\$ 0,60	R\$ 0,60
	ABRAÇADEIRA TIPO "U" ¾"	UNIDADE	1	R\$ 0,50	R\$ 0,50
	TIGRE SOLDÁVEL LUVA REDUÇÃO 75 X 60 mm	UNIDADE	1	R\$ 12,99	R\$ 12,99
	ADAPTADOR PARA MANGUEIRA COM ROSCA EXTERNA ½" AGROJET	UNIDADE	2	R\$ 1,14	R\$ 2,28
	ADAPTADOR PARA MANGUEIRA COM ROSCA INTERNA ¾" AGROJET	UNIDADE	2	R\$ 2,49	R\$ 4,98
	UNIÃO REDUÇÃO ¾" X ½" AGROJET	UNIDADE	1	R\$ 1,64	R\$ 1,64
	ADAPTADOR PARA MANGUEIRA COM ROSCA EXTERNA 1" AGROJET	UNIDADE	4	R\$ 2,52	R\$ 10,08
	MANGUEIRA CRISTAL 1" X 2,0 mm	METRO	3	R\$ 7,15	R\$ 21,45
	LUVA REDUÇÃO ROSCÁVEL 1" X ¾"	UNIDADE	2	R\$ 3,22	R\$ 6,44
	PONTEIRA EXTERNA BORRACHA 1.½"	UNIDADE	4	R\$ 3,35	R\$ 13,40
	MANGUEIRA CRISTAL ½" X 2,0 mm	METRO	11	R\$ 3,20	R\$ 35,20
	PLASTILIT SOLDÁVEL LUVA 25 mm X ¾"	UNIDADE	1	R\$ 0,75	R\$ 0,75
	PLASTILIT SOLDÁVEL LUVA 60 mm	UNIDADE	1	R\$ 6,53	R\$ 6,53
	TUBO SOLDÁVEL 60 mm PLASTILIT	METRO	2	R\$ 11,44	R\$ 22,88
	TORNEIRA BOIA PARA BEBEDOURO ½" ASTRA	UNIDADE	1	R\$ 7,89	R\$ 7,89
	ADAPTADOR FLANGE SOLDÁVEL 32 mm X 1" PLASTILIT	UNIDADE	1	R\$ 9,95	R\$ 9,95
	ADAPTADOR FLANGE SOLDÁVEL 20 mm X ½" PLASTILIT	UNIDADE	1	R\$ 6,90	R\$ 6,90
	REGISTRO ESFERA ROSCA EXTERNA ¾" DURIN	UNIDADE	1	R\$ 14,75	R\$ 14,75
	FITA VEDA ROSCA 18 mm X 50 m MGA	UNIDADE	1	R\$ 12,95	R\$ 12,95
	LUVA ROSCÁVEL ½"	UNIDADE	1	R\$ 0,75	R\$ 0,75
<b>BOMBEAMENTO</b>	BOMBA ANAUGER 800	UNIDADE	1	R\$ 349,90	R\$ 349,90
	PLUGUE 2P+T MACHO 10 A AZ/PT/V	UNIDADE	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
<b>ASpersORES</b>	1/2G-16 - BICO FULLJET, LATÃO	UNIDADE	1	R\$ 151,53	R\$ 151,53
	1/2HH-36SQ - BICO FULLJET, LATÃO	UNIDADE	1	R\$ 96,48	R\$ 96,48
	1/2G-32 - BICO FULLJET, LATÃO	UNIDADE	1	R\$ 151,53	R\$ 151,53
<b>FORMAS - TESTE DA FARINHA</b>	TINTA MARTELADA SINTÉTICO CINZA ESCURO 900 mL	UNIDADE	1	R\$ 23,00	R\$ 23,00
	COMPENSADO DE USO GERAL PINUS 220X160X1,2 cm	UNIDADE	1	R\$ 100,00	R\$ 100,00
	TÍNER 1 LITRO A GRANEL	UNIDADE	1	R\$ 9,00	R\$ 9,00



<b>UNIFORMIDADE</b>	FARINHA DE TRIGO ESPECIAL LUNAR	KG	20	R\$ 2,75	R\$ 55,00
<b>COEFICIENTE DE CRISTHIANSEN</b>	MADEIRITE RESINADO FENOL PINUS 220X110X1,4 cm	UNIDADE	1	R\$ 43,00	R\$ 43,00
	CAP TIGRE ESGOTO 75 mm	UNIDADE	1	R\$ 4,98	R\$ 4,98
	CAP PLASTILIT ESGOTO 75 mm	UNIDADE	24	R\$ 4,11	R\$ 98,64
	TUBO ESGOTO 75 mm PLASTILIT	METRO	8	R\$ 7,63	R\$ 61,04
	NIPEL ROSCÁVEL TIGRE ½"	UNIDADE	1	R\$ 0,85	R\$ 0,85
	TINTA SPRAY AEROSSOL PRATA METAL U. G 350 mL TEKBOND	UNIDADE	1	R\$ 16,51	R\$ 16,51
<b>ARDUINO</b>	SENSOR DE FLUXO DE ÁGUA G ½" 1-30 L/min	UNIDADE	2	R\$ 79,80	R\$ 159,60
	JUMPER PREMIUM PARA PROTOBOARD MACHO-MACHO 20 cm - KIT C/ 20 PEÇAS	UNIDADE	1	R\$ 10,90	R\$ 10,90
	JUMPER PREMIUM PARA PROTOBOARD MACHO-FÊMEA 20 cm - KIT C/ 20 PEÇAS	UNIDADE	1	R\$ 17,90	R\$ 17,90
	VÁLVULA SOLENOIDE PARA ÁGUA 12V 180°	UNIDADE	1	R\$ 39,90	R\$ 39,90
	KIT PROTOTIPAGEM / BASE ACRÍLICA INCOLOR 120X83 mm + PROTOBOARD 400 PONTOS + PARAFUSOS PARA ARD	UNIDADE	1	R\$ 30,90	R\$ 30,90
	ARDUINO UNO R3 + CABO USB	UNIDADE	1	R\$ 49,90	R\$ 49,90
	DISPLAY LCD 16X2 cm COM FUNDO AZUL	UNIDADE	1	R\$ 17,90	R\$ 17,90
	MÓDULO RELÉ 5V 10A 2 CANAIS COM OPTOACOPLADORES	UNIDADE	1	R\$ 15,80	R\$ 15,80
	FRETE	UNIDADE	1	R\$ 29,27	R\$ 29,27
<b>ESTRUTURA</b>	TRENA 5 METROS L500 LARANJA LUKFIN	UNIDADE	1	R\$ 10,72	R\$ 10,72
	LIXA MASSA 120	UNIDADE	1	R\$ 0,59	R\$ 0,59
	TUBO SOLDÁVEL 40 mm PLASTILIT	METRO	30	R\$ 4,77	R\$ 143,10
	CONEXÃO TE SOLDÁVEL 40 mm PLASTILT	UNIDADE	16	R\$ 3,63	R\$ 58,08
	CONEXÃO JOELHO 90° SOLDÁVEL 40 mm PLASTILT	UNIDADE	4	R\$ 1,93	R\$ 7,72
	PARAFUSO	UNIDADE	84	R\$ 0,50	R\$ 42,00
	PORCA	UNIDADE	84	R\$ 0,05	R\$ 4,20
	ADESIVO COLA TUBO 175 g AMAZONAS	UNIDADE	1	R\$ 8,05	R\$ 8,05
	TUBO SOLDÁVEL 40 mm PLASTILIT	METRO	8	R\$ 4,77	R\$ 38,16
	CONEXÃO TE SOLDÁVEL 40 mm PLASTILT	UNIDADE	12	R\$ 3,63	R\$ 43,56
	BARRA ROSQUEÁVEL METÁLICA (80 cm)	UNIDADE	1	R\$ 3,50	R\$ 3,50

<b>FORMA - TESTE INTENSIDADE</b>	PEÇA DE AÇO GALVANIZADO 1 m X 1 m	UNIDADE	1	R\$ 150,00	R\$ 150,00
<b>VALOR TOTAL PAGO</b>					R\$ 3186,83

## 9.2 Quadros usados para cálculo do diâmetro da gota, velocidade final e energia cinética

Quadro 4. Determinação do número de gotas retidas por classe de gota.

Classe	Massa do frasco (g)	Nº de gotas para massa média	Massa frasco + gotas (g)	Massa do nº de gotas (g)	Massa média de uma gota (g)	Massa restante + frasco (g)	Massa total retida em cada peneira (g)	Nº de gotas em cada peneira
>4,00	7,3166	13	7,9329	0,6163	0,04741	7,3166	0,6163	13
3,35-4,75	7,3166	50	8,9033	1,5867	0,03173	10,8286	5,0987	161
2,36-3,35	7,3166	50	8,0974	0,7808	0,01562	23,0276	16,4918	1056
2,00-2,36	7,3166	50	7,6780	0,3614	0,00723	16,4544	9,4992	1314
1,70-2,00	7,3166	50	7,5133	0,1967	0,00393	18,9754	11,8555	3014
1,40-1,70	7,3166	50	7,4438	0,1272	0,00254	11,2443	4,0549	1594
1,18-1,40	7,3166	50	7,3985	0,0819	0,00164	16,3890	9,1543	5589
1,00-1,18	7,3166	50	7,3647	0,0481	0,00096	12,5546	5,2861	5495
0,85-1,00	7,3166	50	7,3471	0,0305	0,00061	12,9489	5,6628	9283
0,425-0,850	7,3166	50	7,3296	0,0130	0,00026	12,1173	4,8137	18514

Quadro 5. Determinação do volume acumulado por classe de gota.

Classe	Diâmetro médio da gota (mm)	Volume da gota d'água (mm <sup>3</sup> )	Volume total (mm <sup>3</sup> )	% do volume total	Volume acumulado (%)
>4,00	4,49	47,41	616,30	0,85	0,85
3,35-4,75	3,93	31,73	5098,70	7,03	7,88
2,36-3,35	3,10	15,62	16491,80	22,74	30,62
2,00-2,36	2,40	7,23	9499,20	13,10	43,71
1,70-2,00	1,96	3,93	11855,50	16,34	60,06
1,40-1,70	1,69	2,54	4054,90	5,59	65,65
1,18-1,40	1,46	1,64	9154,30	12,62	78,27
1,00-1,18	1,22	0,96	5286,10	7,29	85,56
0,85-1,00	1,05	0,61	5662,80	7,81	93,36
0,425-0,850	0,79	0,26	4813,70	6,64	100,00
TOTAL			72533,30	100,00	

Quadro 6. Determinação da energia específica no tempo.

Diâmetro médio (mm)	Velocidade terminal da gota (m/s)	Energia cinética de uma gota (J)	Energia específica no tempo (J/m <sup>2</sup> /s)	% do somatório da energia cinética específica no tempo	% acumulado do somatório da energia cinética específica no tempo
4,49	9,02	1,93x10 <sup>-03</sup>	2,51x10 <sup>-02</sup>	1,55	1,55
3,93	8,83	1,24x10 <sup>-03</sup>	1,99x10 <sup>-01</sup>	12,26	13,80
3,10	8,25	5,31x10 <sup>-04</sup>	5,61x10 <sup>-01</sup>	34,57	48,37
2,40	7,34	1,95x10 <sup>-04</sup>	2,56x10 <sup>-01</sup>	15,77	64,13
1,96	6,52	8,37x10 <sup>-05</sup>	2,52x10 <sup>-01</sup>	15,54	79,67
1,69	5,92	4,46x10 <sup>-05</sup>	7,11x10 <sup>-02</sup>	4,38	84,05
1,46	5,33	2,32x10 <sup>-05</sup>	1,30x10 <sup>-01</sup>	8,01	92,06
1,22	4,64	1,04x10 <sup>-05</sup>	5,70x10 <sup>-02</sup>	3,51	95,57
1,05	4,09	5,11x10 <sup>-06</sup>	4,75x10 <sup>-02</sup>	2,93	98,49
0,79	3,19	1,32x10 <sup>-06</sup>	2,44x10 <sup>-02</sup>	1,51	100,00
TOTAL			1,62	100,00	

### 9.3 Ensaios de solo



Ciente:	MARCELO HENRIQUE DE CASTRO	Tel:	(63) 8476-9391	Cel:	(63) 8476-9391
E-mail:	marcelo_hcastro@hotmail.com	Município:	PALMAS	Estado:	TO
Remetente:	MARCELO	Propriedade:	CAMPUS UFT		
Cultura:	PROJETO	Análise:	Solo	Entrada:	08/10/2018 01:22
Amostra:	AMOSTRA 01 - SNO / 0-30 CM			Emissão:	23/10/2018

#### RESULTADO 0040018

Micronutrientes mg/dm <sup>3</sup> (ppm)		cmolc/dm <sup>3</sup> (mE/100 ml)		pH	
Na:	-	Ca+Mg:	0,60	H <sub>2</sub> O:	-
Co:	-	Ca:	0,37	CaCl <sub>2</sub> :	4,10
Zn:	-	Mg:	0,23		
B:	-	Al:	0,10		
Cu:	-	H+Al:	2,60		
Fe:	-	K:	0,06		
Mn:	-				
Mo:	-				

Dados Complementares		mg/dm <sup>3</sup> (ppm)		Textura (%)	
CTC:	3,26	K:	23,00	Argila:	26,00
Sat. Bases:	20,25	P(Melich):	0,10	Limo:	0,80
Sat. Al:	13,16	P(Resina):	-	Areia:	73,20
Ca/Mg:	1,61	S:	-		
Ca/K:	6,17				
Mg/K:	3,83				
Ca/CTC:	0,11				
Mg/CTC:	0,07				
K/CTC:	0,02				
H+Al/CTC:	0,80				

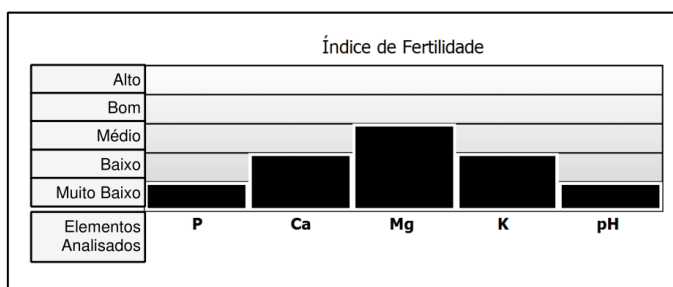
g/dm <sup>3</sup>		g/cm <sup>3</sup>	
Mat.Org.:	3,00	Densidade Aparente:	1,56
Carbono:	-	Densidade Real:	3,2

%	
Mat.Org.:	0,30
Porosidade:	51

Observação:	
-------------	--



*Reinaldo Gil*

Reinaldo Gil  
Engenheiro Agrônomo  
CREA 77816 / D

*Maurício Bassani dos Santos*

Maurício Bassani dos Santos  
Zootecnista  
CRMV: TO 0126 / Z

204 Sul, Avenida LO 3 Lote 2

Fone/Fax (63)3213-1630

(98484-2329

CEP:77.020-464

Palmas-TO

[www.zoofertil.com.br](http://www.zoofertil.com.br)

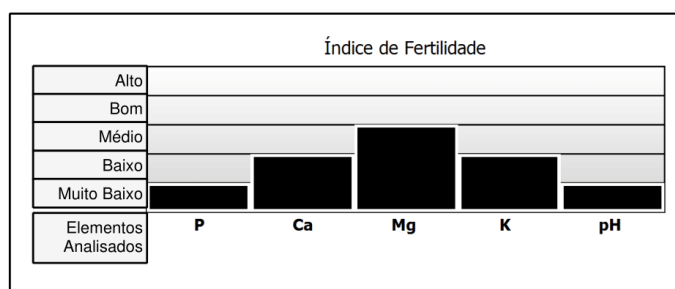
[zoofertil@zoofertil.com.br](mailto:zoofertil@zoofertil.com.br)

Ciente:	MARCELO HENRIQUE DE CASTRO	Tel:	(63) 8476-9391	Cel:	(63) 8476-9391
E-mail:	marcelo_hcastro@hotmail.com	Município:	PALMAS	Estado:	TO
Remetente:	MARCELO	Propriedade:	CAMPUS UFT		
Cultura:	PROJETO	Análise:	Solo	Entrada:	08/10/2018 01:22
Amostra:	AMOSTRA 02 - SCE / 0-30 CM			Emissão:	23/10/2018

## RESULTADO 0040019

Micronutrientes mg/dm <sup>3</sup> (ppm)		cmolc/dm <sup>3</sup> (mE/100 ml)		pH	
Na:	-	Ca+Mg:	0,56	H <sub>2</sub> O:	-
Co:	-	Ca:	0,35	CaCl <sub>2</sub> :	4,00
Zn:	-	Mg:	0,21		
B:	-	Al:	0,20	Textura (%)	
Cu:	-	H+Al:	2,20	Argila:	20,00
Fe:	-	K:	0,04	Limo:	2,80
Mn:	-			Areia:	77,20
Mo:	-				
Dados Complementares		mg/dm <sup>3</sup> (ppm)		Textura (g/Kg)	
CTC:	2,80	K:	16,00	Argila:	200,00
Sat. Bases:	21,43	P(Melich):	0,10	Limo:	28,00
Sat. Al:	25,00	P(Resina):	-	Areia:	772,00
Ca/Mg:	1,67	S:	-		
Ca/K:	8,75	g/dm <sup>3</sup>		g/cm <sup>3</sup>	
Mg/K:	5,25	Mat.Org.:	3,00	Densidade Aparente:	1,4
Ca/CTC:	0,13	Carbono:	-	Densidade Real:	3,1
Mg/CTC:	0,08	%			
K/CTC:	0,01	Mat.Org.:	0,30		
H+Al/CTC:	0,79	Porosidade:	55		

Observação:



*Reinaldo Gil*

Reinaldo Gil  
Engenheiro Agrônomo  
CREA 77816 / D

*Maurício Bassani dos Santos*

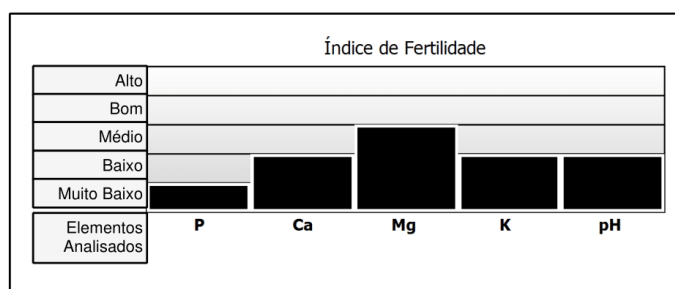
Maurício Bassani dos Santos  
Zootecnista  
CRMV: TO 0126 / Z

Cliente:	MARCELO HENRIQUE DE CASTRO	Tel:	(63) 8476-9391	Cel:	(63) 8476-9391
E-mail:	marcelo_hcastro@hotmail.com	Município:	PALMAS	Estado:	TO
Remetente:	MARCELO	Propriedade:	CAMPUS UFT		
Cultura:	PROJETO	Análise:	Solo	Entrada:	08/10/2018 01:23
Amostra:	AMOSTRA 03 - SSU/ 0-30 CM			Emissão:	23/10/2018

## RESULTADO 0040020

Micronutrientes mg/dm <sup>3</sup> (ppm)		cmolc/dm <sup>3</sup> (mE/100 ml)		pH	
Na:	-	Ca+Mg:	0,73	H <sub>2</sub> O:	-
Co:	-	Ca:	0,48	CaCl <sub>2</sub> :	4,60
Zn:	-	Mg:	0,25		
B:	-	Al:	0,10	Textura (%)	
Cu:	-	H+Al:	1,90	Argila:	20,00
Fe:	-	K:	0,05	Limo:	2,00
Mn:	-			Areia:	78,00
Mo:	-				
Dados Complementares		mg/dm <sup>3</sup> (ppm)		Textura (g/Kg)	
CTC:	2,68	K:	19,00	Argila:	200,00
Sat. Bases:	29,10	P(Melich):	0,10	Limo:	20,00
Sat. Al:	11,36	P(Resina):	-	Areia:	780,00
Ca/Mg:	1,92	S:	-		
Ca/K:	9,60	g/dm <sup>3</sup>		g/cm <sup>3</sup>	
Mg/K:	5,00	Mat.Org.:	3,00	Densidade Aparente:	1,5
Ca/CTC:	0,18	Carbono:	-	Densidade Real:	3,03
Mg/CTC:	0,09	%			
K/CTC:	0,02	Mat.Org.:	0,30		
H+Al/CTC:	0,71	Porosidade:	50		

Observação:



*Reinaldo Gil*

Reinaldo Gil  
Engenheiro Agrônomo  
CREA 77816 / D

*Maurício Bassani dos Santos*

Maurício Bassani dos Santos  
Zootecnista  
CRMV: TO 0126 / Z