

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**MODELAGEM FÍSICA E NUMÉRICA DA INFILTRAÇÃO E
ESCOAMENTO EM SUPERFÍCIES NÃO SATURADAS E
COM COBERTURA VEGETATIVA**

THIAGO AUGUSTO MENDES

ORIENTADOR: JUAN FÉLIX RODRIGUEZ REBOLLEDO

COORIENTADOR: GILSON DE FARIAS NEVES GITIRANA JR.

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD-158/2019

BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO/2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MODELAGEM FÍSICA E NUMÉRICA DA INFILTRAÇÃO E
ESCOAMENTO EM SUPERFÍCIES NÃO SATURADAS E COM
COBERTURA VEGETATIVA**

THIAGO AUGUSTO MENDES

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:



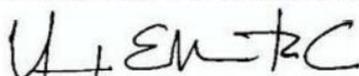
**PROF. JUAN FÉLIX RODRIGUEZ REBOLLEDO, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)**



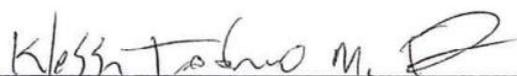
**PROF. GILSON DE FARIAS NEVES GITIRANA JR., PhD (UFG)
(COORIENTADOR)**



**PROF. ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**PROF. HERNAN EDUARDO MARTINEZ CARVAJAL, PhD (UNAL)
(EXAMINADOR EXTERNO)**



**PROF. KLEBBER TEODORO MARTINS FORMIGA, PhD (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

FICHA CATALOGRÁFICA

THIAGO AUGUSTO MENDES

Modelagem física e numérica da infiltração e escoamento em superfícies não saturadas e com cobertura vegetativa, Distrito Federal, 2019. xxvi, 255 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2019)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|--|------------------------|
| 1. Coeficiente de escoamento superficial do solo | 2. Solos não saturados |
| 3. Interação Solo-Atmosfera-Vegetação | 4. Simulador de chuva |

I. ENC/FT/UnB

II. Doutor

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MENDES, T. A. (2019). Modelagem física e numérica da infiltração e escoamento em superfícies não saturadas e com cobertura vegetativa. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-158/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 255 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Thiago Augusto Mendes

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Modelagem física e numérica da infiltração e escoamento em superfícies não saturadas e com cobertura vegetativa.

GRAU/ANO: Doutor/2019.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Thiago Augusto Mendes

engenhoaugusto@gmail.com

Ao meu Deus e à minha família por sempre confiar em mim.

Teoria pode explicar tudo, mas nem sempre pode funcionar. Prática é saber fazer funcionar mesmo não sabendo explicar o porquê. Nesta pesquisa, teoria e prática foram combinadas.

Autor desconhecido.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à toda minha família, em especial, ao meu pai Agostinho Mendes, minha mãe Manoela de Fátima Afonso Mendes, minha esposa Ludmila Oliveira Santana Mendes e meu filho Enzo Heitor Santana Mendes por acompanharem todo o processo ao longo destes 6 anos de pesquisa. Em seguida, agradeço:

- ao meu orientador e amigo, professor Juan Félix Rodríguez Rebolledo e coorientador, Gilson de Farias Neves Gitirana Jr., pela ajuda, apoio e acompanhamento ao longo da pesquisa e por confiar em parte em minhas idéias;

- ao meu primo Valdivino Eustáquio Afonso e meus tios Lázaro Mércia de Almeida e Salvador Marques do Nascimento (*in memoriam*);

- aos professores Manoel Porfírio Cordão Neto, Carlos Alberto Lauro Vargas, Maurício Martines Sales e Klebber Teodomiro Martins Formiga;

- aos colegas engenheiros e engenheiras civis Marta Pereira da Luz, Alexandre Garcez de Araújo, Renato Cabral, Joel Roberto Guimarães Vasco e Deusair Rodrigues dos Santos;

- aos colegas de Doutorado, em especial, André Augusto Nóbrega Dantas, Victor Hugo Franco Rattia, Maria Teresa e Vinícius Naves de Oliveira;

- aos estagiários de Engenharia Civil Anna Marinella Carizzio Monteiro, Roniel Ribeiro Costa e em especial, ao Sávio Aparecido dos Santos Pereira, aos de Engenharia Ambiental e Engenharia de Controle e Automação da PUC Goiás Pedro Augusto Gonzaga Moreira e Ítallo Augusto Peixoto Chagas, respectivamente.

Por último, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), em especial ao Programa Institucional de Bolsas de Qualificação dos Servidores (PIQS – IFG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e à Furnas Centrais Elétricas S A (P&D ANEEL Bioengenharia PD, 0394-1603/2016), pelo apoio financeiro.

RESUMO

MODELAGEM FÍSICA E NUMÉRICA DA INFILTRAÇÃO E ESCOAMENTO EM SUPERFÍCIES NÃO SATURADAS E COM COBERTURA VEGETATIVA

Entender o dinamismo entre as interações hidrológicas e agrogeotécnicas, representadas pelo coeficiente de escoamento superficial, C , é extremamente importante e necessário para compreensão dos fenômenos de infiltração, percolação e escoamento superficial, principalmente quando existe a presença da cobertura vegetativa. Adoções equivocadas de C com base em julgamento pessoal (a partir de tabelas e ábacos previamente desenvolvidos para outras áreas e tipos de solo e cobertura), ao invés de dados de campo (modelos físicos) para estimativa de vazões de pico, podem ser preocupantes do ponto de vista do tempo de resposta, ainda pouco estudada quando se trata de presença vegetativa. Sendo assim, esta pesquisa apresenta como foi desenvolvido o modelo numérico capaz de representar e subsidiar a construção do modelo físico (simulador de chuva) para estudos hidrogeotécnicos aplicados a solos regionais goianos com e sem cobertura vegetativa do tipo gramínea (*Paspalum notatum*), considerando sua calibração e verificação. Apresenta também como foram as etapas de planejamento, projeto, forma de operação, escolha e uso de sensores e aplicabilidade do modelo físico, finalizando com calibração do equipamento (simulador de chuva, SC). Os resultados sobre o modelo numérico permitiram identificar que o mecanismo de escoamento superficial no SC possui três estágios com significado físico claro, apresentando valor de escoamento superficial do ponto central das amostras aproximadamente igual ao valor médio obtido a partir dos dois pontos das bordas. O efeito da espessura e grau inicial de saturação das amostras são perceptíveis, ou seja, a espessura afeta os tempos de equilíbrio das amostras como resultado de caminhos de movimento de umidade mais longos. Já o grau inicial de saturação, por outro lado, controla a condutividade hidráulica insaturada inicial e média. Os erros numéricos consideram o processo de calibração e foram satisfatórios, indicando índice de erro RMSE máximo de 0,29 e 0,11 para a modelagem com e sem consideração do efeito da cobertura vegetativa, respectivamente. Com relação ao modelo físico, possibilitou a geração de chuvas simuladas a qualquer tempo com características próximas às chuvas naturais, como: uniformidade, apresentando CUC maiores que 70%; distribuição do tamanho de gotas de chuvas, ou seja, número maior de produção de gotas de chuvas entre 2,0 e 2,5 mm; intensidade pluviométricas entre 86,0 a 220,0 mm h⁻¹; velocidade e energia cinética potencialmente maiores que as produzidas por chuvas naturais (150%) para avaliação do solo não saturado com e sem cobertura vegetativa. Em especial, foi possível obter dados de interceptação para a espécie gramínea (*Paspalum notatum*) muito utilizada em obras civis (hídricas e geotécnicas) e na agronomia, girando em torno de 8,0 mm para chuvas de intensidades pluviométricas de até 86,0 mm h⁻¹, inclinações menores que 15° e altura da gramínea de 30 cm. Por fim, o diferencial desta pesquisa está no desenvolvimento de uma robusta ferramenta numérica, utilizando o *software* FlexPDE, capaz de considerar e representar adequadamente aos fenômenos físicos hidrológicos e geotécnicos monitorados a partir da invenção do simulador de chuva, envolvendo diferentes cenários de entrada, como: geometria e inclinação da amostra, intensidade pluviométrica, curva característica solo-água, permeabilidade saturada do solo e cobertura vegetativa, além de possibilitar o universo de aplicação para outras áreas, processos ou temas de interesse.

ABSTRACT

PHYSICAL AND NUMBER MODELING OF INFILTRATION AND RUNOFF IN UNSATURATED AND VEGETATIVE COVERAGE SURFACES

Understanding the dynamism between hydrological and agrogeotechnical interactions, represented by the surface runoff coefficient, C , is extremely important and necessary to comprehend the infiltration, percolation and runoff phenomena, especially when there is the presence of vegetative cover. Misconceptions of C may be concerned, when based on personal judgment only (from tables and abacuses previously developed for other areas and soil types and coverage), rather than field data (physical models) for estimating peak flows. It happens just because of the response time, still little studied when it comes to vegetative presence. Thus, this scientific research shows how the numerical model, capable of representing and supporting the construction of the physical model (rain simulator), was developed for hydrogeotechnical studies applied to Goiás regional soils with and without grass cover (*Paspalum notatum*), considering its calibration and verification. This study also presents the stages of planning, design, operation, choice, and use of sensors, as well as the applicability of the physical model, ending with equipment calibration (rain simulator, RS). The results on the numerical model allowed us to identify that the surface runoff mechanism in the RS has three stages with clear physical significance, presenting surface runoff value of the central point of the samples approximately equal to the mean value obtained from the two edge points. The effect of the thickness and the initial degree of saturation of the samples are noticeable. It means the thickness affects the equilibrium times of the samples as a result of longer humidity movement paths. The initial degree of saturation, on the other hand, controls the initial and the average unsaturated hydraulic conductivity. Numerical errors consider the calibration process and were satisfactory, indicating a maximum RMSE (Root of Mean Square Error) error-index of 0.29 and 0.11 for modeling with and without consideration of the vegetative cover effect, respectively. Regarding the physical model, it allowed the generation of simulated rainfall at any time with characteristics close to natural rainfall, such as uniformity, presenting CUC (Christiansen's Uniformity Coefficient) greater than 70%; rain droplet size distribution, it means larger number of rain droplet production between 2.0 and 2.5 mm; rainfall intensity between 86.0 to 220.0 mm h⁻¹; velocity and kinetic energy potentially higher than those produced by natural rainfall (150%), both considered to evaluate unsaturated soil with and without vegetative cover. In particular, it was possible to obtain interception data for the grass species (*Paspalum notatum*) widely used in civil works (water and geotechnical) and in agronomy, revolving around 8.0 mm for rainfall of up to 86.0 mm h⁻¹, slopes less than 15° and grass height of 30 cm. Finally, the differential of this study is the development of a robust numerical tool, using FlexPDE software, able to properly consider and represent the hydrological and geotechnical physical phenomena monitored from the invention of the rain simulator, involving different input scenarios, such as sample geometry and slope, rainfall intensity, soil-water characteristic curve, saturated soil permeability and vegetative cover, as well as enabling the universe of application to other areas, processes or topics of interest.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA.....	2
1.2 HIPÓTESE	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 ESTRUTURA DA TESE	4
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 INTERAÇÃO SOLO-ATMOSFERA (ISA) E SOLO-ATMOSFERA-VEGETAÇÃO (ISAV) NA PRÁTICA GEOTÉCNICA	5
2.2 INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ÁGUA NO SOLO NA ISA E ISAV.....	8
2.3 TIPOS DE FLUXO ENVOLVIDOS NA ISA E NA ISAV.....	10
2.3.1 Precipitação	10
2.3.1.1 <i>Principais características hidrológicas das chuvas</i>	11
2.3.1.2 <i>Principais características das chuvas - distribuição do tamanho, uniformidade, velocidade e energia cinética das gotas de chuva</i>	12
2.3.1.3 <i>Chuvas intensas</i>	18
2.3.2 Infiltração e Escoamento Superficial	19
2.3.3 Dinâmica da Água no Solo – Teoria de fluxo em solos não saturados.....	25
2.4 INFLUÊNCIA DA COBERTURA VEGETATIVA, EFEITO DAS RAÍZES E EFEITO ESCALA NA ISAV	31
2.5 SIMULADORES DE CHUVAS.....	34
3. MODELAGEM NUMÉRICA DO SIMULADOR DE CHUVA.....	39
3.1 INTRODUÇÃO	39
3.2 MODELAGEM TEÓRICA DE TESTES DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL	42
3.2.1 Fluxo de água em meios saturados e insaturados.....	42
3.2.2 Condição de fronteira da superfície do solo.....	43
3.2.3 Volumes totais de fluxo e coeficiente de escoamento superficial da interação solo-atmosfera	45
3.2.4 Solução das equações governantes.....	47
3.3 ANÁLISES PROPOSTAS	48
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
3.4.1 Estágio 1	54
3.4.2 Estágio 2.....	56

3.4.3	Estágio 3	58
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
4.	MODELAGEM FÍSICA (SIMULADOR DE CHUVA)	65
4.1	INTRODUÇÃO	65
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS	67
4.2.1	Idealização do simulador de chuva (SC).....	67
4.2.2	Construções dos componentes do simulador de chuvas.....	68
4.2.2.1	<i>Módulo aparato</i>	68
4.2.2.2	<i>Módulo geração da chuva</i>	69
4.2.2.3	<i>Módulo monitoramento</i>	72
4.2.3	Calibração dos módulos do simulador de chuva.....	75
4.2.3.1	<i>Calibração do módulo geração das chuvas</i>	75
4.2.3.2	<i>Calibração do módulo monitoramento</i>	76
4.2.3.2.1	<i>Calibração dos sensores de umidade</i>	76
4.2.3.2.2	<i>Saturação dos tensiômetros</i>	78
4.3	RESULTADOS - MODELO FÍSICO DESENVOLVIDO.....	79
4.3.1	Módulo aparato	79
4.3.2	Módulos geração de chuva e monitoramento.....	82
4.3.3	Avaliação das características das chuvas simuladas (artificiais)	85
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O MODELO FÍSICO (SC).....	97
5.	MATERIAIS E ENSAIOS LABORATORIAIS UTILIZADOS	99
5.1	ORIGEM, COLETA E AMOSTRAGEM DO SOLO	99
5.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	101
5.3	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	103
5.4	CURVA CARACTERÍSTICA SOLO-ÁGUA	105
5.5	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA.....	109
6.	ENSAIOS EXPERIMENTAIS UTILIZANDO O SIMULADOR DE CHUVA..	119
6.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLO COMPACTADAS.....	119
6.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLO COM VEGETAÇÃO	124
6.3	PROCEDIMENTOS PREPARATÓRIOS	126
6.3.1	Operação do módulo aparato.....	126
6.3.2	Instalação dos sensores (operação do módulo monitoramento).....	126
6.3.3	Operação do módulo geração de chuva - SC	127

6.4	MONITORAMENTO, AQUISIÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS	129
7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	131
7.1	ENSAIOS EXPERIMENTAIS COM E SEM COBERTURA VEGETATIVA UTILIZANDO O SIMULADOR DE CHUVA	133
7.2	CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	144
7.2.1	Procedimentos adotados para as amostras compactadas sem vegetação	144
7.2.2	Procedimentos adotados para as amostras compactadas com vegetação	149
7.2.3	Processo e resultados da calibração do modelo numérico sem vegetação	150
7.2.4	Processo e resultados da calibração do modelo numérico considerando o efeito da cobertura vegetativa	155
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A PESQUISA	163
8.1	CONCLUSÕES.....	163
8.2	SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	166
	REFERÊNCIAS	169
	ANEXOS.....	181

LISTA DE FIGURAS E QUADROS

Figura 2.1. Fenômenos hidrológicos e efeitos geotécnicos envolvidos na ISA ou ISAV.....	6
Figura 2.2. Fluxograma para determinação da DSD, do coeficiente de arraste e da velocidade terminal das gotas de chuva.	15
Figura 2.3. Capacidade de infiltração real de um solo hipotético baseado na distribuição de chuva também hipotética. Fonte: baseado em Rennó & Soares (2000).....	20
Figura 2.4. Curva número (CN_{VL}) em função da precipitação efetiva acumulada e precipitação total acumulada. Fonte: Hipólito & Vaz (2013).....	24
Figura 2.5. Curvas características solo-água (CCSA) unimodais a) secagem e molhagem (adaptada de Fredlund & Rahardjo, 2012); b) diferentes zonas de dessaturação dos solos (adaptada de Zhai & Rahardjo, 2013).	28
Figura 2.6. CCSA bimodal proposta por Gitirana Jr. & Fredlund (2004).....	29
Figura 2.7. Perfil de umidade e taxa de infiltração de um perfil de solo hipotético durante chuva de intensidade constante (adaptada de Singh, 1989).....	30
Figura 2.8. Escalas espaciais consideradas em estudos de erosões e escoamento superficial do solo pela ação hídrica (baseada em Poesen <i>et al.</i> , 1994).....	32
Figura 2.9. Modelos de SC aspersivos: a) Sousa Júnior <i>et al.</i> (2017); b) Egeli & Pulat (2011).	36
Figura 2.10. Outros modelos de SC aspersivos utilizados em estudos geotécnicos:	36
Figura 3.1. Visão geral dos componentes de fluxo em um SC. Fonte: Mendes <i>et al.</i> (2020)..	41
Figura 3.2. Taxa de infiltração normalizada em função da pressão da água nos poros da superfície do solo.	45
Figura 3.3. Fluxograma da implementação da modelagem numérica do SC no FlexPDE.	48
Figura 3.4. Diferentes cenários simulados e condições correspondentes de geometria, limite e inicial: a) estágio 1: configuração e equilíbrio das amostras; b) estágio 2: amostra inclinada antes da chuva; e c) estágio 3: simulação de chuva.	49
Figura 3.5. Curvas características solo-água utilizadas nas simulações numéricas.	51
Figura 3.6. Funções de condutividade hidráulica modeladas.....	51
Figura 3.7. Exemplo dos dados de saída do modelo numérico: a) malha de elementos finitos inicial; b) malha de elementos finitos, tempo 26 min; c) poropressões iniciais; d) poropressões, tempo 12 min; e) grau de saturação, tempo 12 min e f) balanço hídrico, tempo 26 min, sendo TTPE a precipitação efetiva, TTNETF a infiltração e TTRUNOF o escoamento superficial total.	53
Figura 3.8. Estágio 1 – mudanças na sucção mátrica e grau de saturação no topo das amostras ($L_D = 1,0$ m $H_D = 0,3$ m).....	54

Figura 3.9. Estágio 1 - tempo de equilíbrio hidráulico para $L_D = 1,0$ m e diferentes valores de H_D e S_i	55
Figura 3.10. Etapa 2 - tempo para mudança de 10% na poropressão da superfície da amostra.	56
Figura 3.11. Etapa 2 - tempo para mudança de 10% no grau de saturação da superfície do solo S1.....	56
Figura 3.12. Estágio 3 - poropressões, grau de saturação e escoamento superficial pontual para $S_i = 50\%$ e $H_D = 0,15$ m.....	58
Figura 3.13. Estágio 3 - poropressões, grau de saturação e escoamento superficial pontual para $S_i = 50\%$, $\alpha_D = 15^\circ$ e $H_D = 0,3$ e $0,5$ m.	60
Figura 3.14. Estágio 3 - poropressões, grau de saturação e escoamento superficial pontual para $S_i = 50\%$, $\alpha_D = 45^\circ$ e $H_D = 0,3$ e $0,5$ m.	61
Figura 3.15. Estágio 3 - coeficiente de escoamento superficial para $L_D = 1,0$ m, diferentes espessuras e inclinações das amostras.....	62
Figura 4.1. Idealização inicial do aparato experimental do SC.....	67
Figura 4.2. Especificações técnicas dos aspersores. Fonte: adaptado de Spraying Systems Co® (2008).	71
Figura 4.3. <i>Data loggers</i> utilizados para armazenamento dos dados de conteúdo volumétrico de água e sucções.	73
Figura 4.4. Tensiômetro e sensor de umidade, respectivamente.....	74
Figura 4.5. Esquema completo do SC com seus respectivos módulos de criação.	74
Figura 4.6. Equação de ajuste de calibração do transdutor de pressão para implementação no módulo geração de chuva em sistema PID.....	76
Figura 4.7. Etapas do processo de calibração dos sensores de umidade, Decagon EC-5.	77
Figura 4.8. Volume de influência considerado na medição da umidade do solo pelo sensor EC-5 da Decagon Devices. Fonte: Decagon Devices (2008).	78
Figura 4.9. Etapas do processo de saturação dos tensiômetros (T5-10).	79
Figura 4.10. Módulo aparato: especificações e desenho técnico de todos os componentes metálicos desmontáveis do SC.....	80
Figura 4.11. Detalhes e conexões auxiliares do recipiente acrílico com dimensões de $0,5 \times 0,5 \times 0,3$ m.....	81
Figura 4.12. Vista lateral do recipiente acrílico ($0,5 \times 0,5 \times 0,3$ m) com indicação dos locais de instalação dos sensores de umidades e tensiômetros (sensores de 1 a 5).....	81
Figura 4.13. Sistema PID para controle automático da pressão de serviço: a) inicialmente em <i>protoboard</i> ; b) finalizado em circuito impresso.....	82

Figura 4.14. Tela principal do aplicativo de controle do sistema PID com comunicação via <i>bluetooth</i> para controle automático da pressão de serviço na rede hidráulica do SC desenvolvido.....	84
Figura 4.15. Projeto completo do SC com destaque para o módulo geração de chuva e monitoramento (ensaio realizado com 15° de inclinação para amostra com solo exposto).	85
Figura 4.16. Avaliação do CUC em função da pressão de serviço, tempo de simulação e intensidade pluviométrica real média simulada para área experimental de 1,0 m ² : a) aspersor <i>fulljet</i> ¼”-10SQ-HHSQ jato cone quadrado; b) aspersor <i>fulljet</i> ½”-29SQ-HHSQ jato cone quadrado.	87
Figura 4.17. Disposição dos coletores de chuva simulada para avaliação do CUC em área 1,0 m ² : a) vista superior com identificação; b) após ensaio de 1 min de chuva simulada.	88
Figura 4.18. Avaliação do CUC em função da pressão de serviço e intensidade pluviométrica simulada para área experimental de 0,25 m ² utilizando aspersor <i>fulljet</i> ¼”-10SQ-HHSQ jato cone quadrado.	88
Figura 4.19. Padrões de distribuição espacial médias das chuvas reais simuladas para todos os tempos de simulação para o aspersor ¼”-10SQ-HHSQ jato cone quadrado: a) pressão de 70 kPa e área de 0,25 m ² ; b) pressão de 70 kPa e área de 1,0 m ² ; c) pressão de 100 kPa e área de 0,25 m ² ; d) pressão de 100 kPa e área de 1,0 m ²	90
Figura 4.20. Determinação da distribuição do tamanho das gotas de chuva simuladas, método da farinha: a) realização do ensaio no SC; b) separação dos diferentes tamanhos de grãos produzidos.	91
Figura 4.21. Distribuição do diâmetro das gotas de chuvas simuladas (DSD): a) aspersor ½”-29SQ-HHSQ secagem ao ar e estufa; b) aspersor ½”-29SQ-HHSQ secagem ao ar; c) aspersor ¼”-10SQ-HHSQ secagem ao ar e estufa; d) aspersor ¼”-10SQ-HHSQ secagem ar.	92
Figura 4.22. Determinação do D_{50} para bico aspersor <i>fulljet</i> ¼”-10SQ-HHSQ para área amostral de 0,25 m ² : a) em função da DSD acumulada; b) em função da pressão de serviço.	93
Figura 4.23. Avaliação da velocidade das gotas de chuvas simuladas para cada classe de diâmetro médio produzida pelo bico aspersor <i>fulljet</i> ¼”-10SQ-HHSQ para área amostral de 0,25 m ² : a) velocidade em função do tempo; b) velocidade em função da distância percorrida.	94
Figura 4.24. Forma da gota de chuva. Fonte: adaptado de Beard & Chuang (1987).....	95
Figura 4.25. Porcentagem de energia cinética produzida para cada classe de diâmetros de gotas para área experimental de 0,25 m ² utilizando aspersor <i>fulljet</i> ¼”-10SQ-HHSQ jato cone quadrado.	96
Figura 5.1. Local de retirada do solo (deformado e indeformado) utilizado nos ensaios no SC.	100
Figura 5.2. Carta de plasticidade de solos. C = argila; M = silte; I, H, V = Intermediária, alta, muito alta plasticidade.....	101

Figura 5.3. Curvas granulométricas do solo utilizado no SC. Fonte: Araújo (2019).....	102
Figura 5.4. Curvas de distribuição de poros obtidas a partir de ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio do solo utilizado no SC. Fonte: Araújo (2019).....	103
Figura 5.5. Curvas de compactação utilizando Proctor normal. Fonte: Araújo (2019).	105
Figura 5.6. Equipamentos utilizados para determinação da CCSA: a) placa de pressão (GDS);	106
Figura 5.7. Curvas características solo-água referentes às amostras compactadas (reconstituídas) com $e = 1,0$ ajustadas conforme proposta de Gitirana Jr. & Fredlund (2004): a) secagem principal; b) molhagem; c) 1º secagem e d) todas.....	108
Figura 5.8. Equipamento triaxial utilizado.....	109
Figura 5.9. Processo de moldagem dos CP indeformados com presença de raízes da gramínea <i>Paspalum notatum</i> (grama batatais).....	110
Figura 5.10. Avaliação da condutividade hidráulica saturada dos CP compactados (reconstituídos) em função a) da carga hidráulica aplicada nos ensaios triaxiais, conseqüentemente, gradiente hidráulico; b) dos índices de vazios. Fonte: adaptado de Araújo (2019).	113
Figura 5.11. Condutividade hidráulica saturada dos CP indeformados com presença de raízes (espécie <i>Paspalum notatum</i> - grama batatais) para diferentes profundidades.	113
Figura 5.12. Características das raízes da gramínea <i>Paspalum notatum</i> para os diferentes CP indeformados e profundidades.	115
Figura 5.13. Preparação dos CP com solo reconstituído e vegetação <i>Paspalum notatum</i> ; a) retirada dos CP b) moldagem dos CP.....	116
Figura 5.14. Características das raízes da gramínea <i>Paspalum notatum</i> para os diferentes CP reconstituídos e profundidades.....	117
Figura 6.1. Compactação do solo para confecção das amostras para ensaios no SC a partir da altura das camadas a) primeira camada compactada; b) marcação das alturas das camadas e utilização de colarinho.	119
Figura 6.2. Etapas de preparação e compactação estática das amostras de solo com e sem vegetação a) secagem ao ar até umidade hidrocópica de 5%; b) peneiramento (#2,0), quarteamento e homogeneização do solo para umidade de 18% (de 10 em 10 kg); c) compactação estática de amostras para solo exposto, caixa acrílica e acessórios; d) compactação estática de amostras para solo com vegetação, caixa em madeirite; e) plantio das espécies de gramíneas utilizadas e f) amostras prontas para ensaio no simulador de chuva.....	121
Figura 6.3. Detalhes no procedimento de compactação das camadas das amostras de solo a serem ensaiadas no SC: a) homogeneização; b) escarificação.	123
Figura 6.4. Detalhes da proteção e instalação das amostras de solo a serem ensaiadas no SC:	124

Figura 6.5. Etapas de preparação prévia da amostra de solo compactado com vegetação <i>Paspalum notatum</i> (grama batatais) para posteriores ensaios no SC: a) desmontagem do caixote de madeirite provisório; b) retirada das laterais do caixote de madeirite; c) aspecto e interface base de acrílico-solo sem danificações; d) vista do sistema radicular após retirada do caixote madeirite; e) encaixe completo do recipiente acrílico (lateral) na base acrílica e f) amostra pronta para ensaio no SC já com sensores instalados.	125
Figura 6.6. Ferramentas acessórias utilizadas na instalação dos sensores de umidade e tensiômetros, respectivamente: a) garfo; b) trado.	127
Figura 6.7. Determinação da quantidade de sólidos erodidos e carregados após ensaio no SC: a) em decantação para retirada da água; b) após 24 h na estufa para determinação da massa específica.	129
Figura 7.1. Etapas e detalhes do monitoramento do ensaio realizado no SC para solo sem vegetação (superfície da amostra), 1º Ensaio considerando $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$ e $\alpha_D = 15^\circ$: a) monitoramento das poropressões no Ponto 4 (<i>infield</i>), antes do ensaio; b) monitoramento do conteúdo volumétrico de água, antes do ensaio; c) após 10 min; d) após 30 min; e) após 45 min e f) fim do ensaio, após 60 min.	134
Figura 7.2. Etapas e detalhes do monitoramento do ensaio realizado no SC para solo sem vegetação (superfície da amostra), 3º Ensaio considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$ e $\alpha_D = 15^\circ$: a) monitoramento das poropressões em todos os pontos da amostra (<i>data logger</i>), antes do ensaio; b) monitoramento do conteúdo volumétrico de água, antes do ensaio; c) visão geral do SC antes do ensaio; d) após 10 min; e) após 30 min e f) fim do ensaio, após 60 min.	135
Figura 7.3. Etapas e detalhes do monitoramento do ensaio realizado no SC para solo com vegetação, 1º Ensaio considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$ e $\alpha_D = 15^\circ$: a) amostra preparada para início do ensaio; b) detalhamento dos tensiômetros instalados para monitoramento das poropressões em todos os pontos da amostra (<i>data logger</i> a esquerda); c) realização do ensaio no SC (aplicação da chuva simulada) e d) monitoramento do conteúdo volumétrico de água com detalhe de preparação do recipiente acrílico (interface fundo-lateral), momento do ensaio no SC.	136
Figura 7.4. Evolução do conteúdo volumétrico de água detectado pelos sensores de umidade ($\theta_{wi,sensor}$) no 1º Ensaio sem vegetação, considerando $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$. 137	
Figura 7.5. Evolução do grau de saturação no 1º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$	137
Figura 7.6. Evolução do teor de umidade no 1º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$	137
Figura 7.7. Evolução das poropressões durante o momento de aplicação da chuva simulada (SC) para o Ponto 4 para o 1º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$	138
Figura 7.8. Evolução do conteúdo volumétrico de água detectado pelos sensores de umidade ($\theta_{wi,sensor}$) no 3º Ensaio sem vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$. 139	

Figura 7.9. Evolução do grau de saturação no 3º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$	139
Figura 7.10. Evolução do teor de umidade no 3º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$	140
Figura 7.11. Evolução das poropressões para todos os pontos monitorados no 3º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$	140
Figura 7.12. Evolução das poropressões no momento da aplicação da chuva simulada para os pontos monitorados no 3º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$	140
Figura 7.13. Evolução do escoamento superficial total (R_T) e carreamento de solo monitorados no Ponto 3 durante os ensaios realizados no SC sem cobertura vegetativa, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$: a) 1º Ensaio, $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$; b) 3º Ensaio, $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$	142
Figura 7.14. Evolução das poropressões para todos os pontos monitorados no 1º Ensaio com vegetação (<i>Paspalum notatum</i>), considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$	142
Figura 7.15. Evolução das poropressões no momento de aplicação da chuva simulada para todos os pontos monitorados no 1º Ensaio com vegetação (<i>Paspalum notatum</i>), considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$	142
Figura 7.16. Destaque da condição inicial, ajuste dos parâmetros e CCSA de varredura/calibração para avaliação do modelo numérico a partir do modelo físico sem presença de vegetação para o Ponto 4, considerando $P_P = 220,00 \text{ mm h}^{-1}$ para o 1º Ensaio e $86,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o 3º Ensaio: a) 1º e 3º Ensaio a partir de θ_{wi} e ψ_i ; b) 1º Ensaio a partir de $\theta_{wi,sensor}$ e ψ_i	146
Figura 7.17. Destaque para condição inicial e CCSA de varredura/calibração para modelo numérico a partir do modelo físico sem presença de vegetação considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o 3º Ensaio: a) para o Ponto 3 a partir de θ_{wi} e ψ_i ; b) para o Ponto 5 a partir de θ_{wi} e ψ_i ; c) para o Ponto 3 a partir de $\theta_{wi,sensor}$ e ψ_i e d) para o Ponto 4 a partir de $\theta_{wi,sensor}$ e ψ_i	148
Figura 7.18. Destaque da condição inicial, ajuste dos parâmetros e CCSA de varredura/calibração para avaliação do modelo numérico a partir do modelo físico com presença de vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o 1º Ensaio: a) Ponto 4 a partir de θ_{wi} e ψ_i ; b) Ponto 3 a partir de θ_{wi} e ψ_i	149
Figura 7.19. Determinação do tempo de interceptação promovido pela espécie vegetativa.	150
Figura 7.20. Início do processo de calibração numérica para o solo sem vegetação considerando a condutividade hidráulica saturada do solo determinada nos ensaios laboratoriais: a) poropressões no Ponto 4; b) escoamento superficial total.	150
Figura 7.21. Processo de calibração e validação numérica a partir do resultado do 1º Ensaio físico sem presença de vegetação, considerando $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o Ponto 4: a) modificando a condutividade hidráulica saturada do solo, k_{sat} ; b) erro RMSE.	152

Figura 7.22. Processo de calibração e validação numérica a partir do resultado do 3º Ensaio físico sem presença de vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o Ponto 4: a) modificando a condutividade hidráulica saturada do solo, k_{sat} ; b) erro RMSE.....	152
Figura 7.23. Processo de calibração numérica a partir do resultado do 1º Ensaio físico sem presença de vegetação, considerando $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o Ponto 4: a) escoamento superficial instantâneo, R_S ; b) escoamento superficial total, R_T	153
Figura 7.24. Processo de calibração numérica a partir do resultado do 3º Ensaio físico sem presença de vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o Ponto 4: a) escoamento superficial instantâneo, R_S ; b) escoamento superficial total, R_T	153
Figura 7.25. Índices de erro RMSE com relação às poropressões nos pontos monitorados para o 3º Ensaio sem presença de vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$: a) Ponto 1; b) Ponto 2; c) Ponto 3 e d) Ponto 5.....	154
Figura 7.26. Índices de erro RMSE com relação ao escoamento superficial para o 1º Ensaio sem presença de vegetação, considerando $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$: a) instantâneo, R_S ; b) total, R_T	155
Figura 7.27. Índices de erro RMSE com relação ao escoamento superficial para o 3º Ensaio sem presença de vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$: a) instantâneo, R_S ; b) total, R_T	155
Figura 7.28. Evolução das poropressões para o Ponto 1, 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$	156
Figura 7.29. Evolução das poropressões para o Ponto 2, 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$	156
Figura 7.30. Evolução das poropressões para o Ponto 3, 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$	156
Figura 7.31. Evolução das poropressões para o Ponto 1 durante o processo de calibração numérica do 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$..	157
Figura 7.32. Evolução das poropressões para o Ponto 2 durante o processo de calibração numérica do 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$..	157
Figura 7.33. Evolução das poropressões para o Ponto 3 durante o processo de calibração numérica do 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$..	158
Figura 7.34. Evolução das poropressões para o Ponto 4 durante o processo de calibração numérica do 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$..	158
Figura 7.35. Evolução das poropressões para o Ponto 5 durante o processo de calibração numérica do 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$..	158
Figura 7.36. Índices de erro RMSE com relação às poropressões nos pontos monitorados para o 1º Ensaio com presença de vegetação considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$: a) Ponto 1; b) Ponto 2; c) Ponto 3 e d) Ponto 4.....	159
Figura 7.37. Valores de escoamento superficial para o 1º Ensaio com presença de vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$: a) instantâneo, R_S ; b) total, R_T	160

Figura 7.38. Índices de erro RMSE com relação ao escoamento superficial para o 1º Ensaio com presença de vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$: a) instantâneo, R_S ; b) total, R_T .
..... 161

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Diâmetro e velocidade terminal da gota de chuva em função da intensidade (Montebeller <i>et al.</i> , 2001).....	16
Tabela 2.2. Parâmetros de entrada dos modelos e equações para determinação da taxa de infiltração (baseada em Shao & Baumgartl, 2014 e Hipólito & Vaz, 2013).....	22
Tabela 2.3. Principais características técnicas de alguns SC e das chuvas simuladas por diferentes autores (baseada em Abudi <i>et al.</i> , 2012)	37
Tabela 3.1. Parâmetros de geometria e valores utilizados para avaliar o efeito da escala.	50
Tabela 3.2. Propriedades hidráulicas e condições iniciais.	50
Tabela 4.1. Parâmetros considerados para o projeto estrutural metálico (aparato).....	69
Tabela 4.2. Idealização inicial do aparato experimental do SC.	71
Tabela 4.3. Equações de ajuste da calibração dos sensores de umidade para solo avaliado ($e = 1,0$).	77
Tabela 4.4. Aferição da vazão de saída dos bicos aspersores em função da pressão de serviço (Q_{SA}).	86
Tabela 4.5. Resultados dos experimentos realizados no SC para calibração da intensidade real de chuva simulada considerando diferentes t_a e t_f	89
Tabela 4.6. Vazões que atingem a parcela experimental e a calha coletora do fluxo superficial em função da pressão de serviço	96
Tabela 5.1. Índices físicos do solo estudado	101
Tabela 5.2. Parâmetros de ajuste das curvas características solo-água (Gitirana Jr. & Fredlund, 2004).....	107
Tabela 5.3. Propriedades dos CP com solo indeformado e raízes moldados para os ensaios triaxiais.....	111
Tabela 5.4. Porcentagem de massa das raízes secas ao ar (<i>Paspalum notatum</i>) em relação à massa total dos CP indeformados.....	115
Tabela 5.5. Porcentagem de massa das raízes secas ao ar (<i>Paspalum notatum</i>) em relação à massa total dos CP reconstituídos com a presença da gramínea <i>Paspalum notatum</i>	117
Tabela 6.1. Controle do teor de umidade do solo para preparação da amostra sem vegetação a ser ensaiada no SC (parcelas de 10 kg) – 1º Ensaio.....	123
Tabela 7.1. Parâmetros iniciais medidos e monitorados em cada ensaio realizado no SC. ...	132
Tabela 7.2 - Parâmetros iniciais do solo (Ponto 4) para ajuste da CCSA de molhagem (varredura) para posterior calibração do modelo numérico para ensaio com solo sem vegetação (todos ensaios).....	145
Tabela 7.3 - Parâmetros de ajustes da CCSA de varredura (Gitirana Jr. & Fredlund, 2004) para a calibração do modelo numérico (sem vegetação, considerando o Ponto 4).....	146

Tabela 7.4 - Parâmetros de ajustes da CCSA de varredura (Gitirana Jr. & Fredlund, 2004) para a calibração do modelo numérico (com vegetação, considerando o Ponto 4).	149
Tabela 7.5 - k_H/k_V para solos granulares finos por diferentes autores.	151

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

ASTM: American Society for Testing and Materials

CCSA: Curva Característica Solo-Água

CESS: Coeficiente de Escoamento Superficial do Solo

CESSV: Coeficiente de Escoamento Superficial do Solo Vegetado

CUC: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen

CUD: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição

CUE: Coeficiente de Uniformidade Estatístico

DSD: *Drop Size Distribution* (Tamanho da Distribuição das Gotas de Chuva)

EDP: Equação Diferencial Parcial

IP: Índice de Plasticidade do Solo

ISA: Interação Solo-Atmosfera

ISAV: Interação Solo-Atmosfera-Vegetação

MAPE: Erro Médio Relativo ou Absoluto

Matlab: Matrix Laboratory

MSE: Erro quadrático Médio

RMSE: Raiz do Erro Quadrático Médio

SC: Simulador de Chuva

SIMBOLOGIA

a_1, a_2, a_3 e a_4 : Parâmetros de ajuste da curva característica solo-água proposta por Gitirana & Fredlund (2004).

a : Coeficiente regional constante da curva $i-d-f$ (chuvas máximas).

A_b : Área da bacia hidrográfica.

a_H : Constante do modelo de infiltração de Holtan.

A : Transmissividade do solo.

A_{imp} : Área superficial impermeável da bacia hidrográfica.

A_{impVL} : Área superficial impermeável da superfície ou bacia hidrográfica.

A_s : Área da seção transversal de aço.

A_A : Área da seção transversal do bico aspersor.

b : Coeficiente regional constante da curva $i-d-f$ (chuvas máximas).

c : Coeficiente regional constante da curva $i-d-f$ (chuvas máximas).

C_d : Coeficiente de vazão ou descarga, utilizado para cálculo da velocidade inicial da gota de chuva no simulador de chuva.

C_D : Coeficiente de arraste ou coeficiente de atrito com ar.

C_P : Coeficiente de escoamento superficial pontual do solo.

C_S : Coeficiente de escoamento superficial do solo.

C_T : Coeficiente de escoamento superficial total do solo.

C_{imp} : Coeficiente de impermeabilização.

CN : Curva número definido pelo *Soil Conservation Service* (SCS).

CN_{VL} : Curva número da precipitação efetiva em função da precipitação acumulada (SCS).

d : Coeficiente regional constante da curva *i-d-f* (chuvas máximas).

d_P : Profundidade de empoçamento permitida.

D : Diâmetro das gotas de chuva.

D_{50} : Diâmetro mediano volumétrico das gotas de chuva.

e : Índice de vazios.

e_0 : Índice de vazios inicial.

$E_{aço}$: Módulo de elasticidade do aço.

E_{ca} : Energia cinética da chuva simulada.

f_c : Capacidade de infiltração no solo.

f_y : Tensão nominal máxima ao escoamento do aço.

f_{yd} : Tensão de cálculo ao escoamento do aço.

f_u : Tensão de ruptura do aço.

f_w : Tensão de ruptura do metal da solda.

F_y : Termo de aceleração adicional.

$F_D(v_{ar} - v_g)$: Força de arraste por unidade de massa da partícula.

g : Aceleração da gravidade.

G_S : Peso específico relativo de sólidos do solo.

H : Altura de queda da gota de chuva simulada.

H_D : Espessura da amostra de solo adotada no simulador de chuva.

H_L : Altura da lâmina de água após I_r no simulador de chuva.

i : gradiente hidráulico.

i_m : Declive médio da superfície ou bacia hidrográfica ($m\ m^{-1}$).

i_{mVL} : Declive médio da superfície ou bacia hidrográfica (%).

I : Intensidade média da chuva.

I_s : Intensidade média da chuva simulada, a partir do CUC.
 I_r : Intensidade real da chuva simulada, obtida na parcela amostral do simulador de chuva.
 I_P : Infiltração pontual de água no solo.
 I_S : Infiltração superficial de água no solo.
 I_T : Infiltração total de água no solo.
 IT : Interceptação.
 I_t : Taxa de infiltração acumulada.
 i_o : Taxa de infiltração inicial no solo.
 I_f : Taxa de infiltração final no solo.
 i_t : Taxa de infiltração no solo.
 k : Coeficiente de decaimento de infiltração no solo.
 K_c , K_d e K_i : coeficiente proporcional, derivativo e integral do controlador PID, respectivamente.
 k_{ij}^w : Matriz de condutividade hidráulica do solo.
 k_s^w : Condutividade hidráulica saturada do solo.
 k^w : Condutividade hidráulica do solo.
 k_H : Condutividade hidráulica horizontal do solo.
 k_V : Condutividade hidráulica vertical do solo.
 $k(\theta_w)$: Função condutividade hidráulica do solo em função do conteúdo volumétrico de água.
 L_D : Comprimento da amostra de solo adotado no simulador de chuva.
 L_s : Profundidade do perfil de solo.
 L_w : Lâmina de água média aplicada pelo aspersor.
 m : Constante da distribuição Marshall-Palmer.
 mV : tensão de leitura nos sensores de umidade - mili volts.
 m_2^w : Ceficiente de armazenamento de água no solo.
 M_F : Grandeza física registrada no monitoramento.
 M_N : Grandeza física estimada numericamente.
 n : Porosidade.
 n_a : número de amostras.
 n_c : Número de coletores.
 N : Número de amostras.
 N_o : Valor correspondente a $N_V(D = 0)$.
 $N_V(D)$: Número de gotas presente em um volume de ar (1 m^3).

$N_A(D)$: Número de gotas que atingem uma superfície (m^2).

P_d : Precipitação máxima diária.

P_e : Taxa de precipitação efetiva.

P_o : Perdas iniciais da chuva antes de iniciar o escoamento.

p_i : taxa de impermeabilização.

P_P : Taxa da precipitação pontual.

P_S : Taxa da precipitação superficial.

P_{SER} : Pressão de serviço na rede hidráulica do simulador de chuva.

P_T : Taxa da precipitação total.

q : Constante da distribuição Marshall-Palmer.

Q_c : Vazão captada na calha do simulador de chuva para tempo total de simulação.

Q_{c5} : Vazão captada na calha do simulador de chuva para tempo de 5 min de simulação.

Q_p : Vazão em um ponto da superfície do solo, ou seja, vazão pontual.

Q_s : Vazão instantânea na superfície do solo, ou seja, vazão superficial.

Q_T : Vazão acumulada total na superfície do solo em um intervalo de tempo, ou seja, vazão total.

Q_{SA} : Vazão de saída no bico aspersor em função da pressão de serviço.

Q_T : Vazão máxima de saída (pico).

R_P : Escoamento superficial pontual do solo.

R_S : Escoamento superficial do solo.

R_T : Escoamento superficial total do solo.

R_V : Escoamento superficial pontual do solo vegetado.

R^2 : coeficiente de determinação.

S : Potencial de armazenamento de água no solo.

S_0 : Grau de saturação inicial.

S_{or} : Sortividade do solo.

S_b : Grau de saturação do solo correspondente ao segundo valor da entrada de ar ajustado da curva característica solo-água proposta por Gitirana & Fredlund (2004).

S_{fc} : Capacidade de campo.

S_h : Grau de saturação correspondente à umidade higroscópica.

S_r : Grau de saturação do solo.

S_{res1}, S_{res2} : Grau de saturação do solo correspondente ao primeiro e segundo valor de sucção residual ajustados da curva característica solo-água proposta por Gitirana & Fredlund (2004), respectivamente.

t : Tempo.

t_a, t_f, t_{chuva} : Tempo de abertura, fechamento e duração total da chuva no SC, respectivamente.

t_c : Tempo de concentração da chuva.

t_d : Tempo de duração da chuva, curva *idf*.

t_{eh} : Tempo de equilíbrio hidráulico.

t_{IT} : Tempo de interceptação da chuva.

t_q : Tempo de queda da gota de chuva ao solo.

T_R : Tempo ou período de retorno.

u_a : Pressão do ar.

u_w : Poropressão.

$u_{w,gs}$: Poropressão na superfície do solo.

$(u_a - u_w)$: Sucção matricial.

v_{ar} : Velocidade do ar.

v_g : Velocidade terminal da gota de chuva.

$V(d)$ e V_t : Volume do poro e volume total de poros do solo, respectivamente.

V_{ES} : Volume escoado de chuva.

V_P : Volume precipitado de chuva.

x_i : Direção do sistema de coordenadas.

\bar{x}_{25} : Média de 25 % do total de coletores com as menores precipitações.

X_i : Lâmina média de água precipitada em cada coletor.

\bar{X} : Lâmina média precipitada.

z : Elevação acima do ponto de referência (*datum*).

z_s : Elevação (cota) de instalação do sensor de umidade na caixa acrílica.

Z : Refletividade do radar.

w_L : Limite de liquidez do solo.

w_P : Limite de plasticidade do solo.

α : Coeficiente de ajuste para cálculo do D_{50} .

α_D : Inclinação da amostra de solo adotado no simulador de chuva.

α_K : Coeficiente de proporcionalidade que depende do tipo de solo e intensidade de chuva para o modelo de infiltração de Kostiakov.

β : Coeficiente de ajuste para cálculo do D_{50} .

β_K : Coeficiente de absorção do solo no instante t para o modelo de infiltração de Kostiakov.

y : Coordenada na direção da gravidade ou a elevação em relação a um referencial.

γ_d : Peso específico seco do solo.

γ_n : Peso específico natural do solo.

γ_w : Peso específico da água.

ξ_r : Erro relativo entre as grandezas avaliadas.

$\theta_o, \theta_r, \theta_s$: Teor volumétrico de água inicial, residual e de saturação, respectivamente.

θ_w : Teor volumétrico de água.

ρ_{ar} : Massa específica do ar.

ρ_g : Massa específica da gota de chuva.

ρ_w : Massa específica da água.

Λ : Inclinação da curva $N_V(D)$.

λ : Variável controladora da transição de infiltração no solo.

λ_i : Declividade de saturação.

ν : Coeficiente de Poisson.

π : Sucção osmótica.

ψ : Potencial total da água no solo ou sucção total.

ψ_c : Potencial cinético da água no solo.

ψ_M : Potencial matricial da água no solo.

ψ_o : Potencial osmótico da água no solo.

ψ_p : Potencial de pressão da água no solo.

ψ_z : Potencial de posição ou gravitacional.

ψ_{b1}, ψ_{b2} : Primeiro e segundo valor de entrada de ar ajustados da curva característica solo-água proposta por Gitirana & Fredlund (2004), respectivamente.

ψ_f : Sucção na frente de umedecimento.

ψ_{res1}, ψ_{res2} : Primeiro e segundo valor de sucção residual ajustados da curva característica solo-água proposta por Gitirana & Fredlund (2004), respectivamente.

ϕ : Carga hidráulica.

Φ : Potencial hidráulico.

1. INTRODUÇÃO

As condições e modificações climáticas regem diretamente a quantidade de água presente na atmosfera e na superfície do solo, conceituando e caracterizando a interação solo-atmosfera (ISA). Adicionando o elemento vegetação às interações, com ou sem o efeito das raízes, surge a interação solo-atmosfera-vegetação (ISAV), ainda pouco implementada e aplicada aos modelos numéricos atuais para análise hidrodinâmica de solos tropicais não saturados utilizados em obras geotécnicas como: taludes naturais ou artificiais, barragens de terra, aterros, pavimentos, fundações, barreiras capilares e obras de coberturas vegetativas.

Entender como se processam os mecanismos de entrada da água na superfície do solo após um evento chuvoso, armazenamento, fluxo e escoamento superficial, é, de fato, uma tarefa complexa, além de ser de interesse para diferentes áreas do conhecimento como a geologia, agronomia, hidrologia e geotecnia. É preciso considerar a influência de grande parte das variáveis envolvidas, tais como: intensidade da chuva, ar (temperatura e umidade relativa), condições geotécnicas iniciais do solo (umidade, grau de saturação, sucção mátrica, porosidade), inclinação, uso do solo e vegetação (com e sem o efeito das raízes).

Interesse que pode se converter em interdisciplinaridade, com potencial para minimizar ou evitar que simplificações hidrológicas e agronômicas, antes assumidas em projetos geotécnicos, como a não consideração das características das chuvas (uniformidade e intensidade), a variabilidade espacial e temporal das condições de fronteira e a influência da vegetação, sejam agora consideradas. Nesse contexto, é preciso que os hidrologistas, em seus projetos, considerem com mais atenção e detalhe as simplificações anteriormente utilizadas para os solos homogêneos, saturados e isotrópicos.

Uma das maneiras de simular os processos hidrológicos de precipitação, infiltração e escoamento superficial são os simuladores de chuvas (SC), equipamentos simples e de baixo custo desenvolvidos inicialmente para o entendimento do processo de infiltração e erosão do solo para estudos agrários (Herngren *et al.*, 2005). Segundo Lasceles *et al.* (2000) e Dunkeley (2008), os SC, em especial os aspersivos, são uma ferramenta conveniente para reproduzir eventos de chuva com características específicas, oferecendo maior controle sobre as variáveis que governam os eventos de chuva naturais.

O uso de SC tem sido, dessa forma, ampliado para diversas outras áreas do conhecimento, contribuindo para a realização de estudos e análises, tais como: carreamento de partículas e contaminantes, qualidade da água, evapotranspiração, instrumentação e monitoramento, pavimentação e geotecnia.

Nesta mesma direção, surge a possibilidade de utilizar os SC para entender como a mudança dos parâmetros hidrológicos de precipitação, tipo de cobertura vegetativa em solo tropical não saturado e inclinação interferem na determinação do escoamento superficial desse solo vegetado. Esse tipo de avaliação pode ser muito interessante e importante para a área geotécnica, do ponto de vista comportamental.

1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

Diante da real complexidade e dinamismo das condições de fronteira e contorno relativo ao fluxo de água na interface solo-atmosfera-vegetação e, conseqüentemente, seu efeito na relação hidro-geotécnica, em especial a infiltração e geração do escoamento superficial, pode-se recorrer ao desenvolvimento e calibração de equipamento capaz de representar os fenômenos envolvidos, como é o caso dos SC.

Dessa forma, é justificável utilizar-se dos resultados obtidos em SC (modelo físico) para validação de modelos matemáticos (numéricos) capazes de representar, subsidiar e estimar como e quanto a intensidade da chuva, a vegetação (com ou sem o efeito das raízes), a umidade inicial e a inclinação afetam as condições iniciais do solo, a geração e coeficiente de escoamento superficial para obras geotécnicas, como o caso de pilhas de rejeitos e taludes naturais ou artificiais.

1.2 HIPÓTESE

A hipótese desta tese é a possibilidade de simular processos físicos a partir de modelos numéricos que envolvam os efeitos da interação solo-atmosfera (ISA) considerando ou não a presença e a influência da vegetação para fins geotécnicos, especialmente, no que se refere ao comportamento dos latossolos não saturados com presença de vegetação do tipo gramíneas.

1.3 OBJETIVOS

Levar em conta os efeitos da interação solo-atmosfera (ISA) com e sem vegetação (a partir da modelagem numérica e física) para determinação do coeficiente de escoamento superficial do

solo vegetado é a inovação que se pretende oferecer com esta tese. Para isso, ela é baseada no que existe na literatura e propõe melhorias e novas considerações para as interações geotécnicas-hidrológicas nos quesitos: fator escala (otimização na construção do simulador de chuva), condições geotécnicas (considerações das condições iniciais e de estado do solo, ou seja, não saturado) e hidrológicas (simulação dos fenômenos de precipitação, infiltração, retenção de água no solo e escoamento superficial pontual e total).

Assim, o objetivo principal da pesquisa é a proposição metodológica de estudo da ISA com e sem vegetação para fins geotécnicos por meio do desenvolvimento e calibração de modelos físicos e numéricos considerando diferentes condições de declividade, espessura, tipo de cobertura e umidade inicial das amostras de solo frente às diferentes intensidades de chuva aplicadas.

Dentre os objetivos específicos dessa pesquisa, destacam-se:

- desenvolver um equipamento, ou seja, simulador de chuva (SC) do tipo aspersivo e portátil que permita modelar fisicamente eventos de precipitação atendendo adequadamente aos requisitos de: a) uniformidade da distribuição das gotas de chuva simulada; b) velocidade terminal das gotas de chuva e c) relação entre a energia cinética da chuva simulada e da chuva natural;
- desenvolver um modelo numérico que permita avaliar o efeito escala do SC proposto, determinando, não somente, geometria do equipamento e das amostras de solo a serem ensaiadas, mas também porte e dimensões, possibilitando buscar a representatividade necessária e válida para subsidiar de forma mais adequada a construção do equipamento;
- determinar os parâmetros hidráulicos e geotécnicos do solo tropical com e sem vegetação, a partir de ensaios de campo e laboratoriais para utilizá-los no modelo numérico;
- desenvolver sistema de instrumentação aplicada ao SC que permita controlar e monitorar as condições hidrológicas (tempo e intensidade da chuva), além de monitorar as condições geotécnicas do solo com e sem vegetação (umidade e sucções);
- avaliar a influência de um tipo de cobertura vegetativa (gramínea mais comum utilizada em obras geotécnicas, *Paspalum notatum*) na determinação da infiltração e do escoamento superficial e
- estudar o comportamento de amostras de solo com e sem cobertura vegetal com o objetivo de avaliar a influência da intensidade de chuva, tipo de cobertura vegetativa aplicada

ao solo tropical não saturado e inclinações para subsidiar a modelagem computacional na obtenção da infiltração e escoamento superficial com base conceitual.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A tese foi organizada em sete capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma visão geral sobre o tema sugerido, a motivação e a intencionalidade da pesquisa, além dos objetivos.

No segundo é apresentada a revisão bibliográfica, passando por todos os temas envolvidos na pesquisa: a) interação solo-atmosfera (ISA) e interação solo-atmosfera-vegetação (ISAV) com e sem o efeito das raízes; b) influência e dinâmica da água na ISAV; c) tipos de fluxos envolvidas na ISAV; d) determinação do coeficiente de escoamento superficial do solo vegetado; e) influência da cobertura vegetativa e efeito das raízes; f) conceitos, tipos, característica, vantagens e desvantagens dos simuladores de chuva (SC).

O Capítulo 3 descreve a metodologia e resultados da modelagem numérica proposta, relatando como os métodos, as equações, o *software* numérico e os procedimentos são utilizados na idealização, concepção e na busca do satisfatório fator escala para a produção do SC, ao se considerar a análise de fluxo não saturada do solo sem vegetação.

No quarto capítulo é descrita toda a metodologia de construção física do SC (equipamento), além de detalhar aspectos de calibração dos parâmetros da chuvas artificiais geradas e sensores utilizados para monitorar as mudanças de estado do solo ensaiado (tensiômetros e sensores de umidade).

Todos os parâmetros e variáveis geotécnicas referentes ao solo não saturado e solo com vegetação são apresentados e discutidos no quinto capítulo. Também são descritas as metodologias dos ensaios, os equipamentos utilizados para conhecimento das características do solo de estudo, a preparação das amostras e os procedimentos laboratoriais.

Já no sexto capítulo, são abordadas as etapas de preparação das amostras de solo não saturado com e sem vegetação, os resultados e as discussões relativas aos ensaios realizados no SC, destacando como se dá a inclusão da vegetação na modelagem numérica do SC e sua influência para as obras geotécnicas no que tange à geração do escoamento superficial.

E, finalmente, tem-se o sétimo capítulo que apresenta as conclusões obtidas com a pesquisa e as sugestões para futuros estudos complementares.

2. REVISÃO DA LITERATURA

As obras geotécnicas são afetadas diretamente por condições e modificações atmosféricas, diferentes tipos de cobertura vegetativa e características topográficas. Entender os mecanismos hidrológicos (precipitação, infiltração e escoamento superficial e subsuperficial) e geotécnicos (quantidade de água no solo, sucção, poropressão e tensões no solo) e suas relações no tempo e no espaço requer modelagem numérica e física condizentes com a realidade.

Dessa forma, este capítulo busca fornecer discussões relevantes da literatura sobre os temas envolvidos na tese, além de contribuir para o desenvolvimento e análise da modelagem numérica e para a construção adequada do modelo físico do simulador de chuva para determinação do coeficiente de escoamento superficial do solo vegetado (CESSV). Serão abordados, ainda, assuntos relativos a: interação solo-atmosfera (ISA) e solo-atmosfera-vegetação (ISAV) na prática geotécnica, definições, detalhes técnicos, construção e utilização de simuladores de chuvas (SC), efeito escala e relação entre hidrologia e geotecnia na tentativa de compreender e determinar o CESSV.

2.1 INTERAÇÃO SOLO-ATMOSFERA (ISA) E SOLO-ATMOSFERA-VEGETAÇÃO (ISAV) NA PRÁTICA GEOTÉCNICA

Entende-se por ISA a relação, a dependência e a retroalimentação entre as variáveis condicionantes do solo e as variáveis climáticas. A quantidade de variáveis e fenômenos hidrológicos e geotécnicos envolvidos na ISA pode ser considerada simplificada, visto que, na maioria das análises e aplicações, são negligenciadas as contribuições que a cobertura vegetativa, o efeito escala e o efeito das raízes podem proporcionar, principalmente no que se refere a variações de sucção ao longo do espaço (comprimento) e perfil do solo, perda de solo e escoamento superficial.

Dessa forma, incluir o efeito da cobertura vegetativa e das raízes nas análises e aplicações geotécnicas e hidrológicas torna a interação mais complexa no entendimento e na conexão dos fenômenos envolvidos e seus efeitos, sendo conceituada agora como ISAV. A ISAV conta com a contribuição da evapotranspiração e, possivelmente, da interceptação, podendo ou não levar em conta o efeito das raízes. A Figura 2.1 mostra como se configura a ISA e a ISAV com e sem o efeito das raízes.

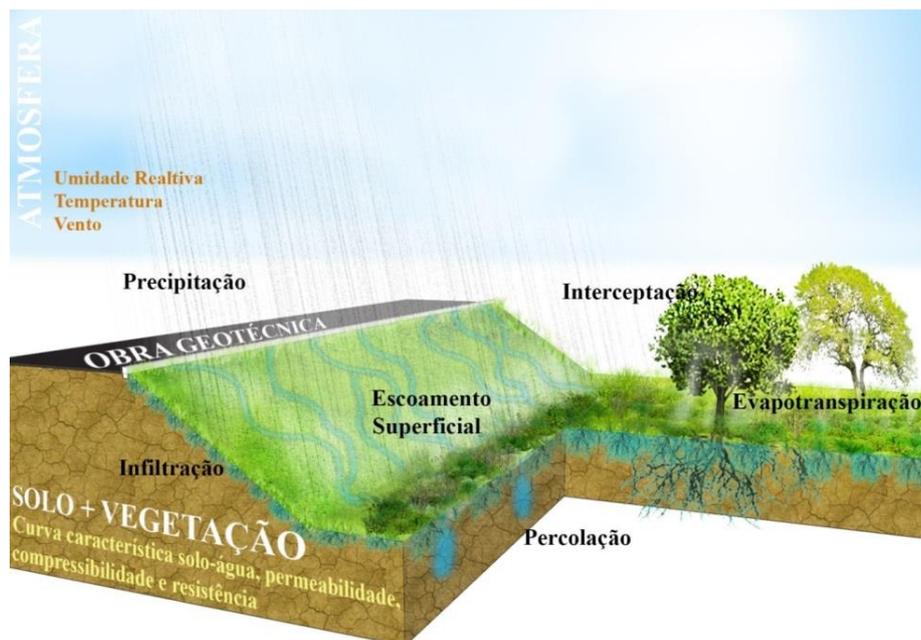


Figura 2.1. Fenômenos hidrológicos e efeitos geotécnicos envolvidos na ISA ou ISAV.

Rodriguez-Iturbe *et al.* (2001) já destacavam não só a importância do clima (ISA), mas também do fator escala e das características do solo na disponibilidade de água para a vegetação (ISAV). Nesta perspectiva, a presença da vegetação afeta tanto características hidrológicas, no que diz respeito aos fenômenos do ciclo hidrológico (em especial a infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial), quanto características geotécnicas, modificando o comportamento do solo (Muñoz-Hoyos, 2014; Ng *et al.*, 2015b).

A maioria dos trabalhos geotécnicos que relacionam a ISA e a ISAV sem o efeito das raízes se dedicam e preocupam com a estabilidade de taludes naturais ou artificiais de infraestruturas civis (barragens, pavimentos, aterros ferroviários e sanitários, obras de cobertura) devido à relação direta que possuem com os desastres ambientais, sociais e econômicos ocasionados pelos deslizamentos desse tipo de construções (Franch, 2008; Aristizábal, 2013; Muñoz-Hoyos, 2014; Silva Júnior, 2015; Ng *et al.*, 2015a).

Franch (2008) avaliou a ISA monitorando em campo a pluviometria, tensões, umidade, nível freático e diferentes revestimentos (não vegetativos) para avaliação de estabilidade de taludes em um campo experimental implantado na zona leste de São Paulo – SP. Concluiu que os aspectos hidrológicos monitorados em campo foram condizentes com os geotécnicos, principalmente no que diz respeito à variação das poropressões nos períodos chuvosos e de estiagem (sazonalidade).

Rodriguez-Iturbe *et al.* (1999) e Muñoz-Hoyos (2014) propuseram metodologia probabilística utilizando ISAV sem o efeito das raízes para avaliação das mudanças nos parâmetros geotécnicos e hidrológicos na estabilidade de taludes, e constatou efeito significativo da vegetação em decorrência da evapotranspiração no comportamento do fator de segurança de taludes. Outra constatação importante apresentada pela autora é que, com relação aos parâmetros da curva característica solo-água (CCSA), o fator de segurança é mais sensível ao valor de entrada de ar e , com relação aos parâmetros da curva de permeabilidade, o fator de segurança é mais sensível à condutividade hidráulica saturada.

Silva Júnior (2015) também utilizou ISAV sem o efeito das raízes, porém, aplicando comportamento rítmico probabilístico em suas análises. Detectou, assim, que chuvas máximas de longa duração afetam a mudança dos parâmetros de desempenho de taludes favorecendo até 50% na probabilidade de ruptura do mesmo, enquanto que chuvas de curta duração oferecem mínimas variações nos parâmetros de desempenho.

Tanto Muñoz-Hoyos (2014) quanto Silva Júnior (2015) recomendam e sugerem, em seus trabalhos, a inclusão do efeito das raízes nas análises de ISAV. Sendo assim, a avaliação da estabilidade de taludes ou de qualquer outro tipo de obra geotécnica (determinação do fator de segurança), como foi considerada, ainda é simplificada.

Assim, outras preocupações geotécnicas merecem destaque, agora incluindo a ISAV com o efeito das raízes: dimensionamento de sistemas de cobertura (Rahardjo *et al.*, 2016); avaliação de cobertura vegetativa e influência do efeito das raízes para diversas práticas geotécnicas como erosões, transporte de sedimentos e até mesmo estabilidade de taludes (Zhang *et al.*, 2014; Ceconni *et al.*, 2012; Ceconni *et al.*, 2014); mudanças nas propriedades hidráulicas do solo (Ng *et al.*, 2014; Leung *et al.*, 2015); retenção de água no solo e mudança da curva característica solo-água (Ng *et al.*, 2016) e, principalmente, tentativas de determinação do CESSV (Fatahi, 2007; Sriwongsitanon & Taesombat, 2011; Mend, 2014; Liu *et al.*, 2014).

Rahardjo *et al.* (2016) avaliam a efetividade de sistemas de cobertura e algumas espécies de cobertura vegetativa no intuito de comprovar a influência do efeito das raízes nos parâmetros geotécnicos (coesão efetiva, ângulo de atrito do solo não saturado e valor de entrada de ar) e nos parâmetros hidrológicos (intensidade de chuva). Destacam que o desempenho das coberturas vegetativas em taludes é essencialmente o mesmo quando submetido à chuva de baixa ou alta intensidade na manutenção das poropressões negativas e sucção mátrica.

Ceconni *et al.* (2014) demonstram a importância do efeito das raízes nos mecanismos hidrológicos na ISAV e no ganho de desempenho de resistência ao cisalhamento do solo na estabilidade de taludes. Também relatam brevemente alguns modelos comerciais possíveis de realizar análises numéricas que envolvam alguns fenômenos relativos à ISAV, como é o caso da quantificação da evapotranspiração pelo Vadose/W (Geoslope International Ltda, 2007).

Assim, o dimensionamento e execução de obras geotécnicas mencionadas anteriormente (e outras como fundações, contenções e sistemas de coberturas) que utilizam ISAV com o efeito das raízes passam a ser interessantes, seja do ponto de vista de maior segurança e ou de economia.

2.2 INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ÁGUA NO SOLO NA ISA E ISAV

Tanto a ISA quanto a ISAV com e sem o efeito das raízes são sistemas altamente influenciados pelas relações de dependência dos fenômenos presentes em cada subsistema hidrológico e geotécnico, tendo sua dinâmica representada pelo comportamento da quantidade de água disponível no solo (Muñoz-Hoyos, 2014). Sendo assim, essa variável pode e consegue demonstrar como os processos se configuram e se apresentam na atmosfera, no solo e na vegetação (Rueda, 2008).

Segundo Abramson *et al.* (2002), a quantidade de água no solo afeta a estabilidade de obras geotécnicas, principalmente a de taludes, seja por geração de poropressões (tanto positivas como negativas), seja por mudanças na densidade dos materiais que formam a obra geotécnica ou maciço de solo natural ou artificial (estratificação do solo), desenvolvimento de erosões internas e de superfície e mudanças nos minerais que constituem os materiais que formam o maciço do solo conseqüentemente, mudanças nos parâmetros geomecânicos.

Rodriguez-Iturbe & Porporato (2004) destacam que a textura, a composição mineralógica, o tamanho e o arranjo das partículas que compõem o solo (meio contínuo) determinam a quantidade de água que o solo consegue armazenar, sendo que diferentes tipos de solos podem armazenar quantidade de água distintas, quando submetidos aos mesmos valores de poropressão.

A variação das poropressões é o processo mais significativo e sua magnitude está fortemente controlada pela permeabilidade do solo (Chowdhury *et al.*, 2010). E como já é de conhecimento que os solos tropicais não saturados estão frequentemente com poropressões negativas (sucção

mátrica), avaliar sua variação ou manutenção ao longo do perfil de solo no tempo com a adição do efeito das raízes pode ser de fato significativo no favorecimento de ganho de resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, de estabilidade de estruturas geotécnicas (Ceconni *et al.*, 2012; Ceconni *et al.*, 2014; Rahardjo *et al.*, 2016).

Segundo Lumb (1975) e Kim *et al.* (2004), dois fenômenos diferentes podem variar a poropressão ao longo do perfil do solo. O primeiro se dá quando as chuvas alimentam o lençol freático (fator climático), reduzindo as tensões efetivas e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento proporcionada pela diminuição da coesão total. O segundo decorre do umedecimento das camadas superficiais do solo, formando uma frente de umedecimento e saturação que vai avançando e reduzindo a sucção (fator climático e/ou geotécnico).

Independentemente do tipo de estrutura geotécnica analisada, o principal agente que causa a diminuição da resistência ao cisalhamento do solo ou o aumento do peso específico natural do solo não saturado é a água. Franch (2008) e Silva Júnior (2015) destacam que a água, além de agente deflagrador de instabilidade do solo, pode ser considerada também um agente preparatório. Isso acontece porque, para solos não saturados, as chuvas antecedentes promovem maior infiltração, aumentando o grau de saturação e a redução da sucção, podendo ocasionar rupturas do maciço de solo associado a chuvas mais intensas.

Crosta (1998) e Aleotti (2004) consideraram que os eventos de chuva curtos e intensos provocam geralmente deslizamentos superficiais, como resultado da redução da resistência ao cisalhamento pela diminuição da sucção, enquanto deslizamentos mais profundos estão relacionados com a distribuição da chuva menos intensas em períodos longos.

Já Rahardjo *et al.* (2016) constataram que, independente da intensidade de chuva ser baixa, alta ou máximas para diferentes cobertura vegetativa (consideraram as espécies Orange Jasmine, *Murraya exotica L.* e Vetiver grass, *Chrysopogon zizaniodes*), existirá manutenção da sucção mátrica do solo de forma muito similar.

Shao & Baumgartl (2014) ressaltam a importância de avaliar e considerar o efeito da intensidade da chuva na previsão dos parâmetros necessários para quantificação do processo de infiltração de água no solo seja para os modelos físicos de Green-Ampt (Green & Ampt, 1911) e Philip (Philip, 1957b) ou para os modelos empíricos de Horton (Horton, 1941) e Holtan (Holtan, 1961). Fato esse que pode ser estendido também para os modelos modernos de

infiltração em solos não saturados, como o de Cavalcante & Zornberg (2017a, 2017b) utilizado por Rojas (2017).

Desta forma, avaliar e determinar matematicamente a entrada e os diferentes tipos de fluxo de água existentes na ISAV com e sem o efeito das raízes são essenciais para compreender a influência que exercem nas obras geotécnicas, seja para eventos com alta ou baixa intensidade pluviométrica.

2.3 TIPOS DE FLUXO ENVOLVIDOS NA ISA E NA ISAV

As mudanças nas poropressões e no grau de saturação do solo são função do fluxo de água que atinge o seu interior (Muñoz-Hoyos, 2014). Para avaliar e quantificar todas as mudanças referentes à variação da quantidade de água no solo, são utilizadas equações que exigem condições iniciais, de fronteira e de contorno que representem a ISA e a ISAV, sendo apresentadas de forma detalhada no Capítulo 3. Essas condições dependem basicamente dos fluxos comentados a seguir:

2.3.1 Precipitação

De acordo com Pinto *et al.* (1976) e WMO (2014), entende-se por precipitação a água proveniente do vapor de água da atmosfera depositada na superfície terrestre na forma de chuva, granizo, orvalho, neblina, neve ou geada. Dentre tais formas, a chuva é a forma de precipitação mais influenciadora nos fenômenos hidrológicos, uma vez que ela é a principal responsável pela geração da infiltração e do escoamento superficial do solo.

Segundo Tucci (2009), as gotas de chuva natural têm diâmetros predominantemente entre 0,2 a 5,0 mm (densidade espacial de 0,1 a 1,0 gota dm^{-3}). Quando uma gota cresce até atingir um diâmetro de 7,0 mm, por exemplo, sua velocidade de queda será de $9,0 \text{ m s}^{-1}$. A uma velocidade tão alta a gota se deforma e se subdivide em gotas menores devido à resistência do ar.

Muitos são os métodos e modelos utilizados para quantificar e espacializar as chuvas, os quais geralmente são fundamentados em técnicas estatísticas. Segundo Mendes (2008), os métodos mais conhecidos para a determinação da precipitação média são: Thiessen (Thiessen & Alter, 1911), que determina a precipitação em qualquer ponto de uma bacia como sendo igual ao precipitado no posto pluviométrico mais próximo; *Trend Surface Analysis* (TSA) (Sanderson & Ahmed, 1979; Singh & Birsoy, 1975; Singh, 1989; 1995), que consiste em uma interpolação linear ponderada; *Reciprocal Distance Squared* (RDS) (Simanton & Osborn, 1979; Tung, 1983)

que considera a precipitação em um ponto como proporcional à chuva medida nos pluviômetros vizinhos e inversamente proporcional ao quadrado da distância; *Kriging* (Bastin *et al.*, 1984), também um interpolador linear ponderado, mas que trabalha com variáveis regionalizadas; método dos Elementos Finitos (Hutchinson & Walley, 1972) e *Multiquadric* (Balascio, 2001; Barbalho *et al.*, 2007).

As principais diferenças e aplicações entre eles estão nas escalas de tempo e espaço envolvidas, nas distribuições probabilísticas utilizadas, na dependência, dependência parcial ou na independência das distribuições da duração e de intensidade das chuvas e na consideração ou não de chuvas antecedentes na área avaliada (bacia hidrográfica ou de drenagem) ao evento de precipitação analisado.

Outra forma de detecção e quantificação de chuvas tem sido a partir de radares meteorológicos. Utilizando-se de relações empíricas existentes entre a chuva e a refletividade dos radares (obtida por sensores), é possível estimar as taxas de precipitações (Rennó & Soares, 2000).

Segundo Muñoz-Hoyos (2014), a influência da precipitação na quantidade de água no solo resulta de dois efeitos climáticos diferentes: (a) influência sazonal, que é cíclica por natureza, sendo para muitos tipos de clima previsível satisfatória; e (b) influência de eventos de precipitação isolados, que são geralmente mais difíceis de prever, tanto em intensidade como em duração.

Assim sendo, a avaliação da profundidade do perfil de solo para qual a precipitação tem influência sobre os fenômenos de infiltração e evapotranspiração e certos tipos de deslizamentos, normalmente, pode ser maior em efeitos sazonais do que em eventos individuais. Pode, por outro lado, ser contrário para a avaliação do CESSV, o qual pode ser mais expressivo para eventos individuais e máximos.

2.3.1.1 Principais características hidrológicas das chuvas

Segundo Tucci (2009) e WMO (2014), as principais grandezas que caracterizam uma chuva são: a) altura pluviométrica, que é a espessura média da lâmina d'água precipitada que recobriria a região atingida pela precipitação admitindo que essa água não infiltrasse, não evaporasse, nem escoasse para fora dos limites da região. Sua unidade é o milímetro (mm) que corresponde 1,0 l de chuva precipitada para 1 m² de área; b) duração (*t_d*) é o período de tempo durante o qual a chuva cai, expressa em minutos ou hora; c) intensidade (*I*) é a precipitação

média por unidade de tempo. A intensidade de uma precipitação apresenta variabilidade temporal, mas para análise dos processos hidrológicos, geralmente são definidos intervalos de tempo nos quais é considerada constante, expressa em mm h^{-1} considerada função da sua duração e tempo de retorno (T_r). Na análise de alturas pluviométricas máximas, o T_r é interpretado como o número médio de anos no qual espera-se que a precipitação analisada seja igualada ou superada. O seu inverso é a probabilidade (p) de um fenômeno igual ou superior ao analisado se apresentar em um ano qualquer (probabilidade anual).

2.3.1.2 Principais características das chuvas - distribuição do tamanho, uniformidade, velocidade e energia cinética das gotas de chuva

A chuva é uma população de gotas de tamanhos variados. Se o número, o tamanho, a massa, o volume e a velocidade das gotas são conhecidos, então grande parte das características da chuva (intensidade, altura, energia cinética) podem ser derivadas destas propriedades. Uma distribuição hipotética do tamanho de gotas é então o ponto inicial para a análise teórica das características da precipitação (Brodie & Rosewell, 2007).

Segundo Brodie & Rosewell (2007), as formas utilizadas para quantificação da distribuição dos tamanhos das gotas de chuvas (*Drop Size Distribution* - DSD) normalmente usadas são:

- distribuição de Marshall-Palmer, tradicionalmente conhecida como DSD. É definida como sendo o número de gotas presente em um volume de 1 m^3 de ar, denominado $N_V(D)$, dada por:

$$N_V(D) = N_o e^{(\Lambda D)} \quad (2.1)$$

- ou distribuição do número de gotas de chuva que atingem uma superfície por unidade de área (1 m^2) e por unidade de tempo (1 s), denominado $N_A(D)$, dada por:

$$N_A(D) = N_V(D) v_g(D) \quad (2.2)$$

onde N_o corresponde ao $N_V(D=0)$ [$\text{L}^{-1}\text{L}^{-3}$]; D é o diâmetro volumétrico médio das gotas [L] e $v_g(D)$ é a velocidade terminal da gota de diâmetro D [LT^{-1}] e Λ é a inclinação da curva $N_V(D)$ no gráfico semi-log [L^{-1}], o qual se relaciona com a intensidade de chuva por meio de uma equação em forma de potência e dois parâmetros m e q (aproximadamente constantes), dado por:

$$\Lambda = mI^{-q} \quad (2.3)$$

onde m e q dependem da intensidade média da chuva I [LT^{-1}] (Joss & Waldvogel, 1967).

Segundo Marshall & Palmer (1948 *apud* Brodie & Rosewell, 2007), N_o é relativamente constante ($N_o = 8000$) e Λ decresce com o incremento da intensidade de chuva, como é apresentado na Equação 2.3.

Experimentalmente, a DSD pode ser determinada por várias técnicas como: a) método da farinha, desenvolvido inicialmente por Bentley (1904), revisado por Hudson (1963, 1964) e que desde então vem sendo utilizado com pequenas modificações por Kincaid *et al.* (1996), Hengren (2004, 2005), Egodawatta (2007), Miguntanna (2009), Pérez-Latorre *et al.* (2010) e Carvalho *et al.* (2012); b) método da mancha ou papel indicador (Lowe, 1892; Marshall *et al.*, 1947; Marshall & Palmer, 1948; Abudi *et al.*, 2012); c) método (imersão) do óleo (Eigel & Moore, 1983); d) método fotográfico (Arnaez *et al.*, 2007; Abudi *et al.*, 2012) e e) dispositivos eletromecânicos ou ópticos, conhecidos como disdrômetros de impactos (acústico e deslocamento) (Joss & Waldvogel, 1967, 1969, 1977; Kinnel, 1972, 1976, 1977; de Jong, 2010) e ópticos (imagem e *scanner*) (Lanzinger *et al.*, 2006; Schönhuber *et al.*, 2008).

Uma extensa revisão sobre a utilização dessas técnicas de medição da distribuição e do tamanho das gotas de chuvas por diferentes pesquisadores mundiais foi elaborada por Kathiravelu *et al.* (2016). Outra técnica também utilizada para quantificar a DSD é a utilização de imagens de radares.

Sousa Júnior (2011) relata que Uijlenhoet & Stricker (1999) derivaram seis conjuntos de equações em forma de potência, relacionando as diferentes combinações de intensidade média da chuva (I), os dois parâmetros da DSD (N_o e Λ) e a refletividade de radar (Z), obtendo-se:

$$D_{50} = \alpha I^\beta \quad (2.4)$$

sendo D_{50} o diâmetro mediano volumétrico das gotas [L] medido em termos de volume ou massa, onde 50% do total do volume da chuva amostrada são composto de gotas com diâmetros maiores do que o valor mediano, I é a intensidade média da chuva [LT^{-1}] e α e β são coeficientes de ajuste. De acordo com Hudson (1963, *apud* Miguntanna, 2009), o D_{50} das chuvas naturais está dentro de uma faixa de 2,0 a 2,5 mm.

Com relação à velocidade terminal da gota de chuva, ela pode ser definida como sendo a velocidade máxima atingida por uma partícula que se move através de um fluido. A velocidade

terminal é atingida quando todas as forças que atuam sobre a partícula se equilibram, resultando em uma aceleração nula (Sousa Júnior, 2011).

A velocidade terminal da gota de chuva pode ser determinada pela Equação 2.5 (Li & Kawano, 1995) e/ou pela Equação 2.6 (Pérez-Latorre *et al.*, 2010).

$$\frac{dv_g}{dt} = g - C_D v_g \quad (2.5)$$

$$\frac{dv_g}{dt} = F_D (v_{ar} - v_g) + \frac{g(\rho_{ar} - \rho_g)}{\rho_g} + F_y \quad (2.6)$$

sendo que v_g é a velocidade terminal da gota no instante t [LT^{-1}], g é a aceleração da gravidade [LT^{-2}], C_D é o coeficiente de arraste [T^{-1}], $F_D(v_{ar}-v_g)$ é a força de arraste por unidade de massa da partícula [LT^{-2}], v_{ar} é a velocidade do ar [LT^{-1}], v_g é a velocidade da gota de chuva no instante t [LT^{-1}], ρ_{ar} é a massa específica do ar [ML^{-3}], ρ_g é a massa específica da gota [ML^{-3}] e F_y é um termo de aceleração adicional [LT^{-2}]. A Equação 2.5 é a simplificação da Equação 2.6 desde que, desconsiderados os efeitos do ar, $C_D = F_D$ e $F_y = 0$.

Alves Sobrinho *et al.* (2008) sugerem a aplicação do método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem para solucionar as Equações 2.5 e 2.6. Para a aplicação do método, faz-se necessário assumir que a velocidade inicial da gota deve ser igual à velocidade inicial do jato de água ao deixar o aspersor.

As Equações 2.5 e 2.6 utilizadas para determinar a velocidade terminal da gota de chuva aplicam a teoria da conservação da quantidade de movimento de partículas em fluidos para diferentes diâmetros de gotas de chuva, admitindo que as gotas sejam esféricas. A aproximação Lagrangiana tem sido usada para descrever o movimento de gotas d'água em outras condições (Crosfield *et al.*, 2009 *apud* Pérez-Latorre *et al.*, 2010).

Todos os termos envolvidos na determinação da DSD, velocidade terminal e do coeficiente de arraste (C_D) são apresentados no fluxograma da Figura 2.2.

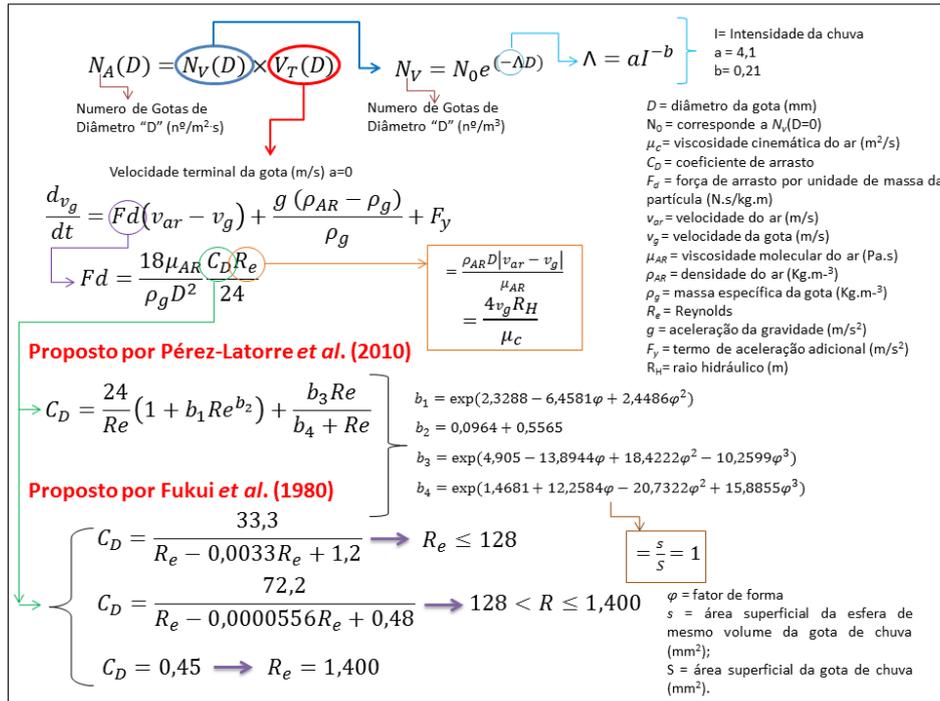


Figura 2.2. Fluxograma para determinação da DSD, do coeficiente de arraste e da velocidade terminal das gotas de chuva.

A velocidade terminal das gotas de chuva também pode ser determinada pela Equação 2.7 (Lima *et al.*, 2006) e também pela Equação 2.8 (Beard & Pruppacher, 1969; Beard, 1976 *apud* van Dijk *et al.*, 2002).

$$v_g = \left(\frac{g}{C_D} \right)^{0,5} \tan \left[t_q (gC_D)^{0,5} \right] \quad (2.7)$$

$$v_g = 0,0561D^3 - 0,91D^2 + 5,03D - 0,254 \quad (2.8)$$

onde C_D é o coeficiente de atrito com o ar (adimensional, porém diferente do C_D da Equação 2.5, página 14); v_g é a velocidade terminal da gota no instante t [LT^{-1}] e t_q é o tempo de queda da gota [T].

O coeficiente de atrito com o ar e o tempo de queda da gota (Equação 2.7) podem ser determinados pela Equação 2.9 e 2.10 respectivamente.

$$C_D = \frac{0,804 - 0,264D + 0,066D^2 - 0,004D^3}{1,109D} \quad (2.9)$$

$$t_q = \arccos \left(e^{(HC_D)} \right) (gC_D)^{-0,5} \quad (2.10)$$

sendo H a altura de queda da gota de chuva [L].

A velocidade terminal da gota de chuva natural ainda pode ser estimada por correlação com a intensidade e diâmetro médio da gota de chuva, conforme proposição de Laws & Pearsons (1943, *apud* Montebeller *et al.*, 2001), apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Diâmetro e velocidade terminal da gota de chuva em função da intensidade (Montebeller *et al.*, 2001)

Diâmetro médio (mm)	Velocidade (m s ⁻¹)	Intensidade de precipitação (mm h ⁻¹)
1,50	5,51	2,90
1,75	6,08	6,73
2,00	6,58	13,96
2,25	7,02	26,54
2,50	7,41	47,18
2,75	7,76	79,37
3,00	8,06	127,62

No que se refere à determinação da energia cinética da chuva, ela é largamente utilizada como indicador do potencial desagregador e compactador do solo desnudo, além de poder aumentar a capacidade de transferência de compostos químicos do solo para também compor o fluxo do escoamento superficial. Assim, a reprodução da energia cinética, pelo simulador de chuvas, semelhante à energia da chuva natural é importante para reproduzir adequadamente os fenômenos hidrológicos envolvidos.

Entretanto, a energia cinética da chuva não é normalmente medida como um parâmetro meteorológico ou geotécnico. Portanto, fórmulas empíricas que relacionam energia cinética com a intensidade de chuva têm sido propostas, baseadas no tamanho e na velocidade terminal das gotas de chuva (Salles *et al.*, 2002).

Segundo van Dijk *et al.* (2002), mudanças na temperatura do ar e especialmente na pressão atmosférica influenciarão na velocidade terminal da gota, interferindo dessa forma no valor da energia cinética. Para altitudes próximas de 1000 m, a energia cinética é cerca de 8% a 10% superior àquela ao nível do mar.

Segundo Salles *et al.* (2002), a energia cinética da chuva resulta, basicamente, do somatório da energia de cada gota que individualmente atinge o solo. A informação obtida a partir das medições da DSD, combinada com a velocidade terminal medida ou determinada a partir de equações empíricas, permite calcular a energia cinética.

Considerando uma gota de chuva individual, a energia cinética é influenciada pelo tamanho da gota (Egodawatta, 2007). Isso ocorre devido a variações tanto da massa como da velocidade terminal associada a cada gota. Entretanto, à medida que um evento de chuva acontece, a energia cinética é influenciada pela intensidade da precipitação. De forma simplificada,

variações da taxa de incremento da energia cinética ocorrem no intervalo de 0 a aproximadamente $25 \text{ J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ para intensidades de 0 a 40 mm h^{-1} . A partir disso, a energia cinética é aproximadamente constante em torno de $25 \text{ J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ (Herngren *et al.*, 2004; Herngren *et al.*, 2005).

Portanto, a energia cinética de impacto sobre o solo da chuva simulada pelos aspersores pode ser estimada pela Equação 2.11, proposta por Stillmunkes & James (1982).

$$E_{C/A} = \rho_g \left(\frac{v_g^2}{2} \right) L_w \quad (2.11)$$

em que: $E_{C/A}$ é a energia cinética da chuva simulada expressa em termos de energia específica no volume (1 m^3) por unidade de área (1 m^2) [MT^{-2}]; ρ_g é a massa específica da água (gota da chuva) [ML^{-3}]; v_g é a velocidade terminal da gota no instante t [LT^{-1}] e L_w é a lâmina de água média aplicada pelos aspersores [L].

Destaca-se que, ao analisar a energia cinética de um evento chuvoso, é necessário levar em conta o efeito do vento e da inclinação da chuva em relação ao terreno. Segundo van Dijk *et al.* (2002), a velocidade das gotas de chuva aumenta sob influência do vento lateral, ao passo que a turbulência do vento pode retardar a velocidade das gotas de chuva.

Rosewell (1983, *apud* Brodie & Rosewell, 2007) observou que a energia cinética da chuva com intensidade na ordem de 100 mm h^{-1} foi aumentada em 39% devido a efeitos do vento. Para esta tese, não será considerada a contribuição do vento.

Para avaliação da uniformidade de distribuição das gotas de chuva pode-se utilizar da proposta de Christiansen (1942), mais conhecida como coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), conforme se vê a seguir:

$$\text{CUC} = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_c} |X_i - \bar{X}|}{n_c \bar{X}} \right) \quad (2.12)$$

em que X_i é a lâmina média de água precipitada em cada coletor [L], \bar{X} é lâmina média precipitada [L] e n_c é o número de coletores.

A uniformidade de distribuição das gotas de chuva também pode ser determinada por outros coeficientes de uniformidade como o Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE),

representado pela Equação 2.13, e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), representado pela Equação 2.14, calculados para cada intensidade de chuva simulada (Bernardo, 2008; Spohr *et al.*, 2015).

$$CUE = 100 \left(1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_c} |X_i - \bar{X}|^2}{(n_c - 1) \bar{X}^2}} \right) \quad (2.13)$$

$$CUD = 100 \frac{\bar{x}_{25}}{\bar{X}} \quad (2.14)$$

sendo que \bar{x}_{25} é a média de 25% do total de coletores com as menores precipitações [L].

Meyer & Harmon (1978), Tossel *et al.* (1987) e Silva (2006) consideram que valores de CUC acima de 80% são aceitáveis para uniformidade de distribuição das gotas de chuva em simuladores de chuvas. Entretanto para Miguntanna (2009), um CUC acima de 70% é considerado suficiente.

2.3.1.3 Chuvas intensas

Tucci (2009) define precipitação máxima como a ocorrência máxima da chuva, com duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma área ou bacia hidrográfica. A determinação das precipitações máximas é um dos caminhos para conhecer a vazão de enchente de uma bacia.

Uma das maneiras de determinar a precipitação máxima é a curva *i-d-f*. A partir de dados pluviométricos, relacionando intensidades (*I*) e durações de chuvas (*t_d*), verifica-se que chuvas mais intensas ocorrem com durações pequenas, ao passo que chuvas menos intensas ocorrem com durações maiores. Com os dados pluviométricos do local de interesse ou com estimativa baseada nos dados dos postos vizinhos, pode-se determinar a função $I = f(t_d, p)$, em que *I* é a intensidade, *t_d* é a duração da chuva e *p* a probabilidade (Tucci, 2009).

As equações de chuvas intensas são de extrema importância para o dimensionamento de obras hidráulicas como: vertedouros, dissipadores de energia, bueiros, canais, drenagem pluvial e de pavimentos, erosões e obras relacionadas a controle de enchentes (que trabalham com infiltração). As equações de chuva intensas (*i-d-f*) podem ser expressas por:

$$I = \frac{aT_r^b}{(t_d + c)^d} \quad (2.15)$$

sendo que I é a intensidade da chuva [LT^{-1}], a , b , c e d são coeficientes regionais constantes que variam de acordo com o local e o tempo de retorno, t_d é a duração da chuva [T] e T_r é o tempo de retorno [T].

Costa e Prado (2003) desenvolveram equações $i-d-f$ para a maioria dos municípios de Goiás e do Sul de Tocantins. As curvas $i-d-f$ para o município de Goiânia – GO, local de estudo do solo analisado neste trabalho, são:

$$I = \frac{56,7928 \left(T_r^{0,1471 + \frac{0,22}{T_r^{0,09}}} \right)^{0,6274}}{(t_d + 24,8)^{0,974711}} \quad \text{Válida para } 1 \text{ ano} \leq T_r \leq 8 \text{ anos} \quad (2.16)$$

$$I = \frac{64,3044 T_r^{0,1471}}{(t_d + 24,8)^{0,974711}} \quad \text{Válida para } 8 \text{ anos} < T_r \leq 100 \text{ anos} \quad (2.17)$$

2.3.2 Infiltração e Escoamento Superficial

Nem toda água proveniente da chuva atinge o solo. Parte da água da chuva que precipita em uma determinada região de controle pode também ser interceptada pela vegetação presente nesta região, a qual pode evaporar-se e retornar à atmosfera ou escorrer pela vegetação e atingir o solo. Tanto a água interceptada quanto a água evaporada não contribuem para infiltração, geração do escoamento superficial e alteração da umidade do solo e, portanto, devem ser subtraídas da quantidade de chuva total que precipitou sobre a região de controle. Outros elementos como restos de vegetais e materiais impermeabilizantes podem também impedir a entrada da água da chuva no solo.

Desse modo, a quantidade de água que consegue atingir a superfície do solo divide-se em duas componentes, infiltração e escoamento superficial. Segundo Tucci (2009), infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo. Portanto, é um processo que depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza e do perfil do solo, do estado de sua superfície e das quantidades de água e ar, inicialmente presentes na superfície e no seu interior. Por outro lado, o escoamento superficial corresponde à toda água que se desloca na superfície até encontrar um talvegue definido, influenciado, principalmente, pela topografia. Então, a água proveniente da chuva que excede a retenção superficial, a infiltração e a evapotranspiração fica disponível para a geração e propagação do escoamento superficial.

A avaliação da água disponível para infiltração, que em quase sua totalidade é proveniente da chuva, deve ser quantificada para diferentes intensidades, duração e frequência. Conhecer e considerar as características básicas das chuvas, como: distribuição, tamanho, velocidade e energia das gotas de chuva e avaliação probabilística espacial são de extrema importância para a completa compreensão dos fenômenos hidrológicos de infiltração e escoamento superficial, os quais impactarão nas principais modificações geotécnicas (umidade, sucção e grau de saturação dos solos).

Com relação à ocorrência do escoamento superficial (geração), tal fenômeno se dá toda vez em que a intensidade da chuva exceder a capacidade de infiltração do solo (f_s) que, por sua vez, é função da umidade do solo, que varia no tempo e no espaço em função das entradas e saídas deste mesmo solo (Rennó & Soares, 2000). Sendo assim, a capacidade de infiltração real do solo pode apresentar um comportamento de decaimento constante ou não para uma dada intensidade de chuva e região, como ilustrado na Figura 2.3. Esse mecanismo é chamado de Hortoniano (Horton, 1933).

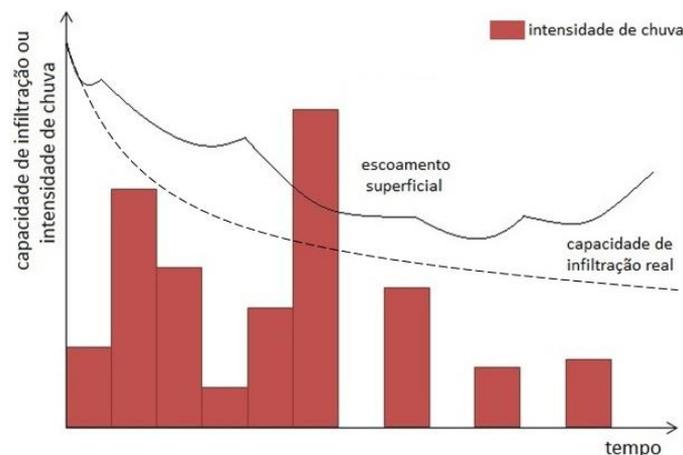


Figura 2.3. Capacidade de infiltração real de um solo hipotético baseado na distribuição de chuva também hipotética. Fonte: baseado em Rennó & Soares (2000).

Quando um solo já saturado recebe um fluxo de água em sua superfície ou subsuperfície maior do que sua capacidade de transferir este fluxo às camadas mais profundas, ocorre também escoamento superficial. Essa outra forma de ocorrência de escoamento superficial está relacionada quando não há mais vazios no solo para ser preenchidos por água, sendo esta abordagem denominada como mecanismo de Dunne (Dunne & Black, 1970). Alguns modelos hidrológicos do tipo reservatório linear consideram este comportamento como o que chamam de tanque cheio.

Nem toda a água que escoa superficialmente chega a um corpo hídrico. Ela pode ficar retida em depressões presentes na superfície ou em obstáculos físicos, podendo ou não evaporar e/ou infiltrar. Sendo assim, quantificar a água que infiltra no solo considerando todas as variáveis e parâmetros envolvidos requer modelagem complexa ou simplificações devem ser consideradas, o que pode justificar os diferentes tipos de modelos de infiltração existentes. Os modelos clássicos de infiltração são classificados como empíricos ou analíticos. Alguns modelos empíricos foram desenvolvidos por Kostiakov (1932), Horton (1941) e Holtan (1961) enquanto Green & Ampt (1911), Philip (1957a) e Cavalcante & Zornberg (2017a, 2017b) desenvolveram modelos analíticos com incorporação dos fenômenos físicos.

Segundo Muñoz-Hoyos (2014), Kostiakov (1932) estabelece uma relação empírica da taxa de infiltração e do tempo, baseada na taxa de infiltração inicial e em uma constante determinada experimentalmente para o local de interesse. Enquanto Horton (1941) propõe uma equação empírica que se baseia na capacidade de infiltração constante quando o tempo tende ao infinito, na taxa de infiltração inicial e final e numa constante de decaimento.

Já a concepção de Holtan (1961) sugere que a infiltração de um valor constante a_H ($\text{mm}^{-0.4} \text{h}^{-1}$) depende do tipo de solo, superfície e vegetação e outro que se refere ao potencial de armazenamento da água no solo.

O modelo Green-Ampt é um modelo conceitual desenvolvido a partir de equações baseadas em processos físicos do escoamento da água em meios porosos, sendo utilizada a lei de Darcy-Buckingham para solos não saturados. Tal modelo leva em conta todos os fatores que influenciam no processo de infiltração, como: teor de umidade volumétrica inicial (θ_o) e teor de umidade volumétrica na saturação ou saturada (θ_s), sucção na frente de umedecimento (ψ_F) e profundidade do perfil de solo (L_s), com a exceção de que o ar está aprisionado e que existe presença de estratificação (Green & Ampt, 1911).

Philip (1957a) desenvolveu uma série temporal para resolver a equação de fluxo de Richards (Richards, 1931), a qual considera os parâmetros de condutividade hidráulica saturada (k_s^w) ou transmissividade da água no solo (A) e sortividade (S_{or}) para estimar a razão de infiltração. A Tabela 2.2 mostra os modelos de infiltração mais utilizados e os parâmetros envolvidos.

Tabela 2.2. Parâmetros de entrada dos modelos e equações para determinação da taxa de infiltração (baseada em Shao & Baumgartl, 2014 e Hipólito & Vaz, 2013).

Modelo de Infiltração	Equação	Parâmetros medidos diretamente†	Parâmetros medidos indiretamente‡
Green–Ampt	$i_t = k_s^w \left[\frac{(\theta_s - \theta_0)\psi_f}{I_t} + 1 \right]$	$k_s^w, \theta_s, \theta_0$	ψ_f
Philip	$i_t = 0,5S_{or}t^{-0,5} + A$	-----	S_{or}, A
Horton	$i_t = i_f + (i_0 - i_f)e^{-k_s t}$	i_f	i_0, k_s
Holtan	$i_t = i_f + a_H(S - I_t)^{1,4}$	i_f	a_H, S
Kostiakov	$i_t = \beta_K t^{-\alpha_K}$	-----	β_K, α_K

sendo: i_t a taxa de infiltração (mm h⁻¹); I_t a infiltração acumulado (mm) no tempo t .

† k_s^w , condutividade hidráulica saturada (mm h⁻¹); θ_s e θ_0 , conteúdo de água saturada e inicial, respectivamente (cm³ cm⁻³); i_f , taxa de infiltração final (mm h⁻¹).

‡ S_{or} , sortividade do solo; A transmissividade de água no solo (mm h⁻¹); i_0 , taxa de infiltração inicial (mm h⁻¹); k , coeficiente de decaimento de infiltração (h⁻¹); a_H , constante no modelo Holtan (mm^{-0,4} h⁻¹); S , potencial de armazenamento de água no solo (mm); β_K e α_K , coeficiente de absorção do solo no instante t (mm h⁻¹) e coeficiente de proporcionalidade que depende do tipo de solo e intensidade da chuva, para o modelo *Kostiakov* respectivamente.

Vários *softwares* hidrológicos distribuídos possuem incorporação desses modelos de infiltração em suas formulações. Shao & Baumgartl (2014) destacam que: o modelo de infiltração de Green–Ampt é largamente utilizado nos modelos hidrológicos WEPP (Laflen *et al.*, 1991), SWAT (Tuppad *et al.*, 2011), SWMM (Rossman, 2010), LISEM (de Roo *et al.*, 1996), HEC 1 (Feldman, 1995) e ANSWERS-2000 (Bouraoui & Dilaha, 1996); o modelo Philip é integrado ao WATFLOOD (Kouwen, 2012) e ao HYSIM (Manley, 1993); o modelo de Horton é incorporado ao MARINE (Borrell *et al.*, 2007) e ao SWMM; e o modelo de Holtan é usado no LISEM, HEC-1 e ANSWERS (Beasley *et al.*, 1980).

Como exemplo da aplicação desses e de outros modelos hidrológicos que se utilizam dos estudos de infiltração citados, destaca-se o trabalho de Mendes (2008) que utilizou o hidrológico HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, 2006). Esse, por sua vez, contém padrões de infiltração de Green–Ampt e Horton já implementados para estimar a infiltração na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite, estado de Goiás, com o intuito de avaliar as vazões geradas, caso houvesse rompimento de pequenos barramentos de água em cascata.

Na tentativa de quantificar e compreender melhor os fenômenos que envolvem o balanço hídrico em determinada área ou bacia hidrográfica (em estudo de agronomia, geotecnia e hidrologia), especificamente no que envolve a transformação da precipitação em escoamento superficial (modelos chuva-vazão), surge a necessidade de determinar um coeficiente de

proporcionalidade que considere toda essa transformação, sendo ele conhecido como coeficiente total de escoamento superficial do solo ou *runoff* (C_T), definido como:

$$C_T = \frac{V_{ES}}{V_P} \quad (2.18)$$

em que V_{ES} é o volume escoado superficialmente [L^3] e V_P é o volume precipitado [L^3].

O C_T (usualmente admitido constante) é um parâmetro que representa o que acontece em uma determinada área ou bacia hidrográfica do ponto de vista de ISA ou ISAV, ou seja, é um fator de conversão da precipitação (entrada) em escoamento superficial (saída) e requer equipamentos de monitoramento (estações pluviométricas e fluviométricas) ou de medição (vertedouros, calhas, molinetes, sensores de nível ou fluxo, *Acoustic Doppler Current Profiler* - ADCP e *Acoustic Doppler Velocimeter* - ADV) para sua determinação física.

O C_T também pode ser determinado por equações empíricas, algumas envolvendo parâmetros do solo e vegetação (geotécnicos e agrônômicos) e da chuva (hidrológico), como as Equações 2.19 de Horner (William, 1949; Chow, 1964; ASCE, 1969) e a Equação 2.20 de Temez (1978); parâmetros do solo e vegetação e da topografia, conforme Equação 2.21 de Schaak, Geyer e Knapp (Choupas, 1995); todos os parâmetros anteriormente citados, conforme Equação 2.23 (Viessman & Lewis, 1996), e apenas parâmetros da propagação da chuva, destacados pela Equação 2.22 de Gregory (Wilken, 1978).

$$C_T = 0,364 \log t_d + 0,042 p_i - 0,145 \quad (2.19)$$

$$C_T = \frac{(P_d - P_o)(P_d + 23P_o)}{\left(P_d - 11 \left(\frac{5080}{CN} - 50,8 \right) \right)^2} \quad (2.20)$$

$$C_T = 0,14 + 0,64 \left(\frac{A_{imp}}{A_b} \right) + 5i_m \quad (2.21)$$

$$C_T = 0,175 t_c^{\frac{1}{3}} \quad (2.22)$$

$$C_T = 7,2 \cdot 10^{-7} CN_{VL}^3 T_r^{0,05} \left[(0,01 CN_{VL})^{0,6} \right]^{-i_{mVL} \cdot 0,2} \left(\frac{A_{impVL} + I}{2} \right)^{0,7} (0,0001 CN_{VL}^{1,48})^{0,15 - 0,004 I} \quad (2.23)$$

onde t_d é o tempo de duração da chuva [T]; p_i é a taxa impermeabilização [%]; P_o são as perdas iniciais da chuva antes de iniciar o escoamento, dada por $(5080/CN - 50,8)$; C_{imp} é o coeficiente de impermeabilização do solo dado por A_{imp}/A_b ; i_m e i_{mVL} são o declive médio da superfície ou bacia hidrográfica em $[L^{-1}]$ e (%), respectivamente; A_{imp} e A_{impVL} é a área superficial impermeável da superfície ou da bacia hidrográfica em $[L^2]$ e (%), respectivamente; A_b é a área da bacia hidrográfica $[L^2]$; P_d é a precipitação máxima diária [L]; P_o são perdas iniciais da chuva antes de iniciar escoamento [L], normalmente varia de 24,0 a 35,0 mm; CN é definido pela curva dada pelo *Soil Conservation Service* (SCS); CN_{VL} é o valor curva número da precipitação efetiva em função da precipitação acumulada (obtido graficamente, Figura 2.4) e t_c é o tempo de concentração da chuva [T].

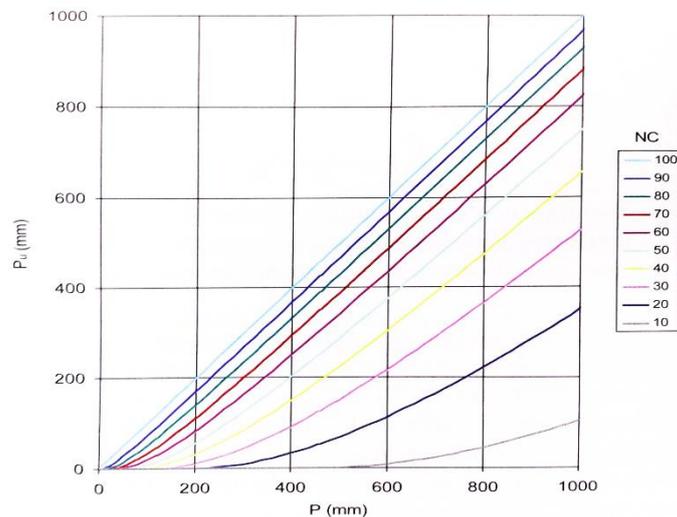


Figura 2.4. Curva número (CN_{VL}) em função da precipitação efetiva acumulada e precipitação total acumulada. Fonte: Hipólito & Vaz (2013).

Existem inúmeras formulações para a determinação de t_c , sendo as mais comuns as propostas de Kirpich (Chow, 1964), do Departamento Nacional de Obras Contra a Seca (DNOS) (Mello, 1973), da *Federal Highway Authority* (FHA, 2011) e de George Ribeiro (Garcez, 1967).

Porém, Silveira (2005) relata de forma detalhada estudo envolvendo diferentes formulações e determinações de t_c (cerca de 23 fórmulas de diferentes autores), avaliando aplicabilidades e restrições tanto para áreas urbanas quanto rurais.

O C_T quando considerado constante e tratado empiricamente, é muito utilizado na determinação de vazões de pico (cheia), por meio de duas abordagens muito conhecidas e utilizadas, que são o método *Racional* e o do *Soil Conservation Service* (SCS). Utilizado dessa forma, C_T pode não

retratar satisfatoriamente as transformações hidrológicas e geotécnicas que ocorrem na área avaliada, devido ao fato de os tempo de duração (t_d) e de retorno (T_R) adotados para a chuva (intensidade de chuva constante) não representar o evento real de precipitação acontecida, refletindo na determinação da vazão de pico (Sen, 2008; Young *et al.*, 2009).

Schaake *et al.* (1967) avaliaram e determinaram o C_T para pequenas bacias hidrográficas (menores que 0,6 km²) baseando-se em curtos registros de dados de frequência chuva-vazão (estudo limitado) e constataram que C_T varia significativamente com a área avaliada e muito pouco com T_R (evento de precipitação), ou seja, com a permeabilidade.

Em contrapartida, French *et al.* (1974) e Hotchkiss & Provaznik (1995) estimaram o C_{ESS} para grandes (maiores que 250 km²) e pequenas bacias hidrográficas, respectivamente, utilizando intervalos de registro de dados chuva-vazão maiores do que Schaake *et al.* (1967), concluindo que C_{ESS} está fortemente dependente de T_R e do espaço.

Pilgrim & Cordery (1993) e Young *et al.* (2009) indicam que o método Racional é aceitável e aplicável em bacias maiores do que normalmente é assumido (1,0 km²), ou seja, maiores que 250 km², desde que considerada a escala temporal do evento de precipitação (frequência de dados chuva-vazão), representando de forma coerente a ISA mas, não detalham e avaliam as características do solo (umidade, sucção ou conteúdo de água) e topografia avaliados.

2.3.3 Dinâmica da Água no Solo – Teoria de fluxo em solos não saturados

A percolação corresponde à água que se movimenta dentro do solo, atingindo ou não o lençol freático. Na maioria das situações, a percolação da água no solo não é unidimensional nem uniforme ao longo da área perpendicular ao fluxo e, por isso, é de extremo interesse conhecer as condições que regulam este fenômeno.

A infiltração e a percolação estão intimamente ligadas, pois a primeira não pode continuar a menos que a percolação ofereça espaço suficiente nos vazios do solo. Por sua vez, a percolação depende da capacidade de armazenamento, ligado às características hidráulicas do solo (Muñoz-Hoyos, 2014).

Do ponto de vista hidrológico, o perfil de solo pode ser dividido em duas zonas. A primeira é a zona de aeração ou zona não saturada que compreende desde a superfície do solo até o lençol freático abaixo do qual está a segunda zona denominada saturada (Rennó & Soares, 2000). Os macroporos presentes no solo, ou seja, os espaços entre as partículas deste solo, podem ou não

estar totalmente preenchidos por água, como na zona saturada, ou estar parcialmente preenchidos por ar, como na zona não saturada. Situações que dependerão das condições ou interações entre a atmosfera, o solo e a vegetação para dado tempo e espaço, ou seja, situações dinâmicas.

Em busca de entendimento do processo de movimentação da água dentro dos solos, desde o início da infiltração até a distribuição ao longo do perfil de solo ao lençol freático, é importante entender como as forças atuam nas partículas de água determinando o sentido e a velocidade da frente de umedecimento. Sendo assim, a energia com a qual o solo retém (armazena) a água é medida em termos de potencial total termodinâmico da água presente nos poros em relação ao potencial da água livre, ou seja, o parâmetro sucção total, ψ (Lu & Likos, 2004), e sempre será direcionada para a região de menor potencial. Esse potencial pode ser ajustado na equação de energia de Bernoulli acrescentando os potenciais osmótico, matricial e térmico (Machado & Vilar, 2015), dado por:

$$\psi = \psi_Z + \psi_C + \psi_P + \psi_O + \psi_M + \psi_T \quad (2.24)$$

sendo ψ é o potencial total da água no solo [$ML^{-1}T^{-2}$], ψ_Z é o potencial de posição ou gravitacional [$ML^{-1}T^{-2}$], ψ_C é o potencial cinético da água no solo [$ML^{-1}T^{-2}$], ψ_P é o potencial de pressão da água no solo [$ML^{-1}T^{-2}$], ψ_O é o potencial osmótico da água no solo [$ML^{-1}T^{-2}$], ψ_M é o potencial matricial da água no solo [$ML^{-1}T^{-2}$] e ψ_T é o potencial térmico da água no solo [$ML^{-1}T^{-2}$].

O potencial gravitacional, ψ_Z , é baseado na posição da partícula de água dentro do campo gravitacional, considerando como superfície de referência o nível do mar. A força gravitacional é sempre positiva e orientada para baixo, o que faz com que a água, desconsiderando os outros potenciais, tenha a tendência de se mover verticalmente para baixo ao longo da profundidade do solo.

O potencial cinético, ψ_C , está associado à velocidade do fluxo de água no solo, sendo desprezível para a maioria dos solos, pois, apresentam baixa permeabilidade. Referindo-se ao potencial de pressão, ψ_P , esse só será considerado caso a pressão na água for maior que a pressão atmosférica padrão o que, para os solos não saturados, hipoteticamente admite-se continuidade da fase de ar em seus vazios e, portanto, a pressão do ar intersticial pode ser admitida como a atmosférica.

Com relação ao potencial osmótico, ψ_o , advindo da osmose, está relacionado com a presença e a concentração de sais livres presentes na água, existentes nos poros do solo. Geralmente, o potencial osmótico é desconsiderado para a maioria das aplicações geotécnicas, porém, seu efeito deve ser levado em consideração quando se trabalha com solos salinos (Miller & Nelson, 2006; Fredlund & Rahardjo, 2012). Em solos não saturados, o potencial osmótico é representado em termos de sucção osmótica, simbolizada por π .

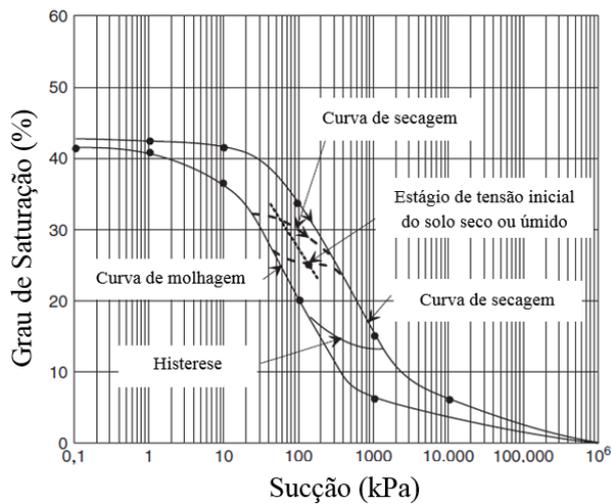
Já o potencial matricial, ψ_M , se refere a fenômenos de capilaridade existente nos interstícios do solo e da adsorção que mantêm a água aderida às partículas sólidas. Todo solo possui uma máxima capacidade de reter água (expressa pela sucção matricial do solo), sendo que o excesso de água é drenado através do processo de percolação sob ação do potencial gravitacional. E, finalmente, o potencial térmico, ψ_T , que só é relevante quando existir diferenças substanciais de temperatura no domínio de solo avaliado, sendo desprezível para este estudo.

Assim, a análise de sucção total, ψ , para este trabalho considera apenas o efeito dos potenciais gravitacional, pressão e mátrico, desprezando os outros potenciais existentes na Equação 2.24, os quais não são relevantes para o tipo e o domínio de interesse do solo não saturado avaliado.

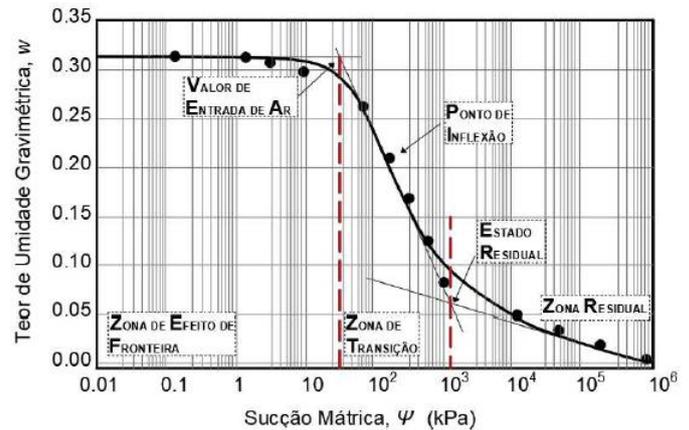
Para representar o comportamento dos diferentes tipos de solos não saturados, considerando os efeitos entre umidade e sucção matricial, pode-se recorrer às curvas de retenção, conhecidas também como curvas características solo-água (CCSA), onde as condições de umidade podem estar representadas em termos de teor de umidade gravimétrica, w , umidade volumétrica, θ_w , ou grau de saturação, S_r . Existem diversos métodos para a obtenção da CCSA, tais como: placa de sucção ou pressão, papel filtro, potenciômetro de ponto de orvalho, sensores térmicos e tensiômetros. Cada método trabalha em diferentes faixas de sucção e podem medir sucção matricial ou total.

A Figura 2.5a ilustra algumas CCSA típicas, sendo importante observar que a relação entre a umidade e a sucção matricial é diferente se este solo estiver recebendo ou perdendo água. A diferença entre estas curvas é denominada histerese do solo.

Outras informações importantes obtidas com as CCSA são as faixas de sucção que delimitam as principais zonas existentes do solo não saturado (Figura 2.5b), tendo o valor de entrada de ar e de sucção residual como delimitantes, respectivamente (Fredlund, 2006).



(a)



(b)

Figura 2.5. Curvas características solo-água (CCSA) unimodais a) secagem e molhagem (adaptada de Fredlund & Rahardjo, 2012); b) diferentes zonas de dessaturação dos solos (adaptada de Zhai & Rahardjo, 2013).

Uma variedade de funções de ajuste ou previsão da CCSA são apresentadas na literatura, tais como aquelas propostas por Burdine (1953), Brooks & Corey (1964), Mualem (1976), van Genuchten (1980), Fredlund & Xing (1994) e Fredlund *et al.* (1994). A adequação de qualquer função de propriedade selecionada depende do tipo de solo.

Para esta pesquisa, foi adotada a equação de CCSA proposta por Gitirana Jr. & Fredlund (2004), com caráter bimodal, ou seja, possui dois valores de entrada de ar (VEA) muito bem definidos. Esse tipo de CCSA é normal para solos de clima tropical e pode representar bem o comportamento do solo a ser analisado nesta pesquisa (Goiânia – GO).

Ainda segundo Gitirana Jr. & Fredlund (2004), quatro hipérbolas são necessárias para a construção da curva de ajuste bimodal, delineadas por cinco assíntotas definidas pelos pares de pontos $(0,1)$, $(\psi_{b1}, 1)$, (ψ_{res1}, S_{res1}) , (ψ_{b2}, S_b) , (ψ_{res2}, S_{res2}) e $(10^6, 0)$. Os parâmetros de ajuste da CCSA são: ψ_{b1} e ψ_{b2} , sendo o primeiro e segundo valor de entrada de ar, respectivamente; ψ_{res1} e ψ_{res2} , como o primeiro e segundo valor de sucção residual, respectivamente; S_{res1} , S_{res2} e S_b sendo os valores de grau de saturação correspondente ao primeiro e segundo valor de sucção residual e segundo valor de entrada de ar, como mostra a Figura 2.6. Maiores detalhes podem ser consultados em Gitirana Jr. & Fredlund (2004).

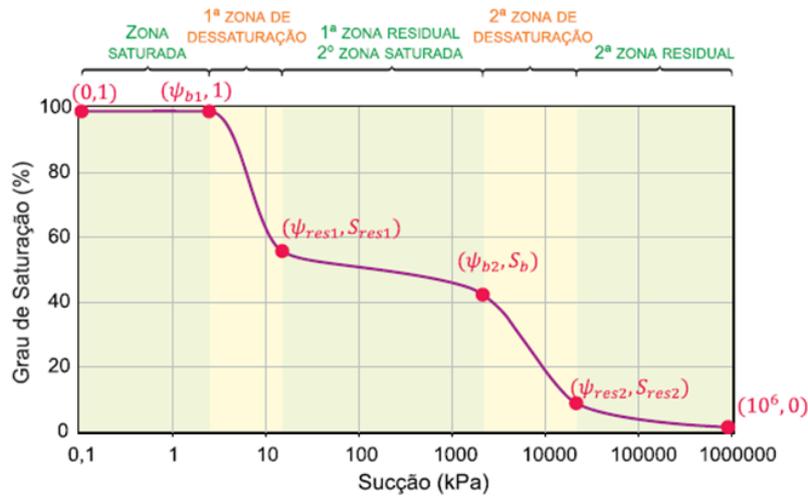


Figura 2.6. CCSA bimodal proposta por Gitirana Jr. & Fredlund (2004).

Relacionando à hidrologia, para eventos chuvosos onde ocorra empoçamento da água, seja por estruturas de armazenamento ou pequenas declividades apresentadas pelo solo, o potencial hidráulico, Φ_H , representado pela carga hidráulica, ϕ , passa a ter importância no processo de infiltração, sendo equacionados respectivamente por:

$$\Phi_H = -zg + \frac{\psi}{\rho_w} \quad (2.25)$$

$$\phi = -z + \frac{u_w}{\gamma_w} \quad (2.26)$$

onde Φ_H é o potencial hidráulico do fluido no volume de controle [L^2T^{-2}], z é a elevação acima do ponto de referência, ou *datum* [L], g é a aceleração da gravidade [LT^{-2}], ψ é a sucção total do solo, agora assumida como a sucção mátrica [$ML^{-1}T^{-2}$], ρ_w é a densidade do fluido [ML^{-3}], γ_w é o peso específico do fluido [$ML^{-2}T^{-2}$], ϕ é a carga hidráulica [L] e u_w é a pressão da água no solo ou poropressão [$ML^{-1}T^{-2}$].

Inicialmente, a sucção total ψ ou $(u_a - u_w)$ domina o processo mas, com a percolação (movimento da água ao longo do perfil do solo), a umidade tende a aumentar e sucção matricial perde progressivamente importância, conseqüentemente reduzindo a coesão do solo. Próximo à saturação, ψ_z torna-se predominante. A taxa máxima na qual a água entra no solo é denominada capacidade de infiltração (Rennó & Soares, 2000).

A Figura 2.7 ilustra a distribuição de água ao longo do perfil do solo durante e após a infiltração, considerando que não existam perdas por evapotranspiração e nem influência de raízes.

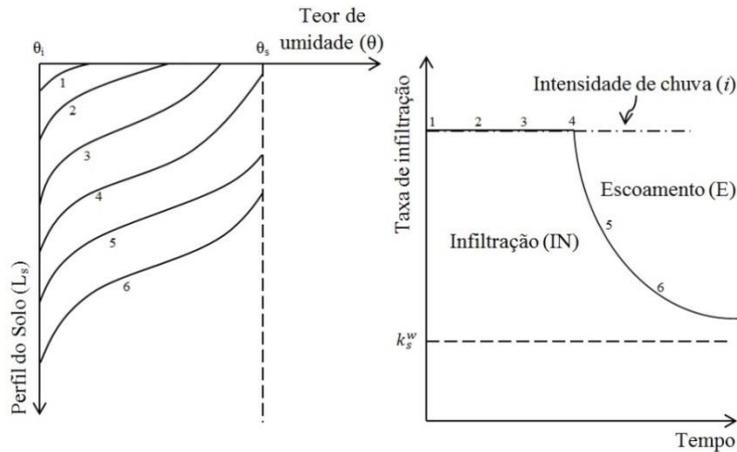


Figura 2.7. Perfil de umidade e taxa de infiltração de um perfil de solo hipotético durante chuva de intensidade constante (adaptada de Singh, 1989).

Para descrever o movimento da água em solos não saturados, pode-se recorrer a lei de Darcy-Buckingham (Equação 2.27), inicialmente elaborada por Darcy (1856) para solos com temperatura constante, saturados, homogêneo, estável, incompressível, isotérmico e não histerético e a equação de continuidade da água (Equação 2.28), aplicada ao princípio de conservação de massa para um elemento de solo unitário.

$$v_i = -k_{ij}^w \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = -k_{ij}^w \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{u_w}{\partial x_i} - z \right) \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial (\rho_w n S_r)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_w v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.28)$$

sendo v_i a velocidade da água [LT⁻¹], k_{ij}^w é a matriz de condutividade hidráulica [LT⁻¹], que é função do grau de saturação e do volume de vazios [LT⁻¹], $(\partial \phi / \partial x_i)$ o vetor de gradiente hidráulico, n a porosidade do solo, S_r o grau de saturação do solo, t o tempo e x_i a direção do sistema de coordenadas assumido.

Considerando a faixa de tensões atuantes na maioria dos problemas de engenharia civil, em especial os geotécnicos, pode-se considerar que a água seja incompressível, que o teor de umidade volumétrica de água presente nos vazios do solo seja $\theta_w = n S_r$ e a Equação 2.28 é simplificada, para:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.29)$$

sendo θ_w o teor volumétrico de água do solo [L^3L^{-3}], ou seja, variações no teor de umidade do solo relacionadas às sucções.

Assim, substituindo a Equação 2.27 na Equação 2.29, obtêm-se a equação que descreve o fluxo de água no solo não saturado:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(-k_{ij}^w \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial \theta_w}{\partial t} = 0 \quad (2.30)$$

2.4 INFLUÊNCIA DA COBERTURA VEGETATIVA, EFEITO DAS RAÍZES E EFEITO ESCALA NA ISAV

A grande quantidade e variabilidade de materiais utilizados como coberturas de solo nas áreas agrícola, ambiental e geotécnica possuem um elevado potencial na conservação e no controle de erosões, no aumento da infiltração e na redução do escoamento superficial do solo (Smets *et al.*, 2008a; Sadeghi *et al.*, 2015). São exemplos de materiais de cobertura do solo: lixo foliar, pedaços e/ou cascas de madeira, palhas dos mais diversos tipos (ex. arroz), geotêxteis biológicos, cascalho, pedras trituradas e, em especial, diversas espécies de cobertura vegetal do tipo gramíneas.

O efeito das coberturas no que diz respeito a ISAV depende de muitos fatores, como: condições iniciais do estado do solo, tipo e taxa de cobertura, erosividade e energia cinética das gotas de chuva e inclinação e comprimento do talude (Amimoto, 1981; Poesen & Lavee, 1991; Adekalu *et al.*, 2007; Jordán *et al.*, 2010; Sadeghi *et al.*, 2015). Deve-se destacar que a última característica descrita é de extrema relevância para as áreas da hidrologia e da geotecnia e requer avaliação adequada de sua influência na geração do escoamento superficial do solo, chamado efeito escala, para avaliação e aplicação em projetos de engenharia.

Estudos sobre a influência do efeito escala no escoamento superficial (*runoff*) ainda são escassos e os que há são recentes (Martinez *et al.*, 2017). Embora existam alguns trabalhos sobre a avaliação do efeito escala combinado à utilização de diferentes coberturas vegetativas, e, em especial, as gramíneas, eles são raros, pouco detalhados e os efeitos não são considerados na maioria dos projetos de engenharia. Na Figura 2.8 são destacadas as diferentes escalas consideradas nas avaliações envolvendo as áreas de agronomia, hidrologia e geotecnia.

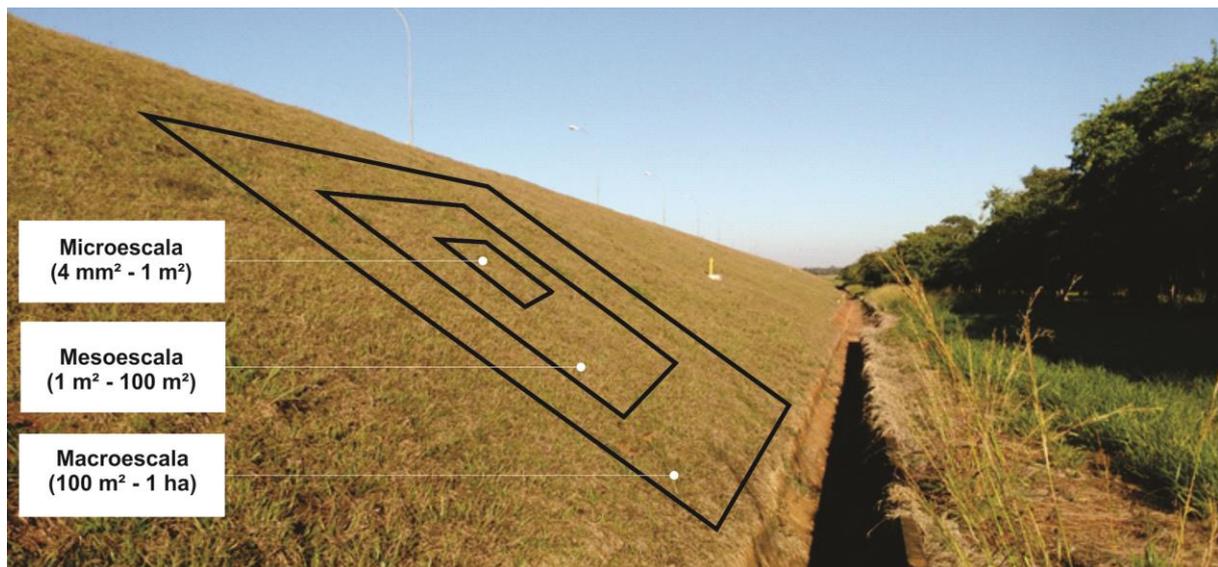


Figura 2.8. Escalas espaciais consideradas em estudos de erosões e escoamento superficial do solo pela ação hídrica (baseada em Poesen *et al.*, 1994).

Poesen *et al.* (1994) destacam que na microescala, tanto a erosão quanto o escoamento superficial, R_p , são maiores, mas caso a razão de cobertura (utilização de pedregulho) seja 100,0%, a erosão do solo pode ser mínima e, conseqüentemente, o escoamento superficial também é diminuído. Na mesoescala (*interiril*) houve inúmeras variações (positiva, negativa, linear e não linear) no que diz respeito à produção de sedimentos e à erosão do solo dependendo da estrutura e da estratificação do solo de cobertura, do tamanho dos fragmentos de pedregulhos e da declividade da superfície. E, por fim, na macroescala, houve diminuição exponencial da produção de sedimentos, erosões do solo e escoamento superficial.

Cerdan *et al.* (2002) avaliaram o efeito escala (considerando macroescala) na geração do escoamento superficial em diferentes regiões e constataram que existe uma significativa diminuição do escoamento superficial com o aumento da área avaliada e cobertura vegetativa.

Smets *et al.* (2008a, 2008b) avaliaram o efeito escala para diferentes comprimentos de parcela do solo (1D) utilizando coberturas vegetativas diversas e os resultados mostraram redução da erosão e do escoamento superficial, em especial, para maiores comprimentos. Em parcelas com menor comprimento, a resposta ao escoamento superficial e perda de solo são mais evidentes, destacando a contribuição dos efeitos físicos (hidrológicos e geotécnicos) compensada pelo tempo-espaço da amostra e a influência das condições de contorno utilizadas.

A avaliação da importância do efeito escala na geração do escoamento superficial e a constatação de que R_p (*runoff*) é maior para áreas menores também foram investigadas e percebidas por Poesen & Lavee (1991), Cerdan *et al.* (2004), Gomi *et al.* (2008), Kidron (2011),

Delmas *et al.* (2012) e Martinez *et al.* (2017) que utilizaram diferentes tipos e razões de cobertura vegetativa e declividades diversas.

Em contrapartida, Mingguo *et al.* (2007) e Sadeghi *et al.* (2015) evidenciam o aumento do escoamento superficial em suas investigações com o aumento do comprimento das parcelas de solo. Porém, Mingguo *et al.* (2007) destacam que, na macroescala, a redução na produção de sedimentos é maior que o escoamento superficial, o que pode ser constatado também em Sadeghi *et al.* (2015).

Sadeghi *et al.* (2015) estudaram a influência do efeito escala (parcelas de 0,25 a 6,0 m²) no coeficiente e no tempo do escoamento superficial e perda de solo utilizando cobertura vegetativa do tipo palha para diferentes intensidades de chuva (50 e 90 mm h⁻¹). Concluíram que os maiores efeitos (menor perda de solo e escoamento superficial) foram detectados em parcelas de áreas menores (0,25 m²) quando submetidos a maiores intensidades de chuva (90 mm h⁻¹). Ainda, Sadeghi *et al.* (2015) explicam que esse efeito pode estar relacionado à decorrência de armazenamento de água e maior tempo de acumulação superficial promovido pela cobertura vegetativa utilizada.

As diferenças entre os tipos de cobertura utilizados, a forma de aplicação e a intensidade da chuva, bem como o tipo de solo e, principalmente, a inclinação da superfície, podem ser as razões potenciais pelo contraditório anteriormente citado.

Porém, estudos mais detalhados envolvendo a influência do efeito escala sob diferentes declividades da superfície, umidade antecedente e utilização ou não de cobertura vegetativa do tipo gramínea, são praticamente inexistentes na atualidade geotécnica, sendo, portanto, foco de investigação desta tese, conforme descrito no Capítulo 3.

Vários aspectos referentes à cobertura vegetativa podem afetar diretamente a resposta hidrológica. O principal impacto está no balanço de água, na energia na superfície do solo e tipo e no porte da cobertura vegetativa. A cobertura vegetativa, por meio do processo de transpiração das plantas, contribui com mais de 90% do vapor de água e transferência de calor latente do solo no mundo, excedendo o valor do escoamento na maioria das regiões (Dingman, 2015).

Dingman (2015) ainda elenca as principais propriedades das diferentes coberturas vegetativas que influenciam os solos frente aos fenômenos do ciclo hidrológico, sendo elas: fração do

terreno protegido pelas folhas, altura da vegetação, condutância de água das folhas, extensão da área de sistemas radiculares de plantas (raízes) e biota associada e profundidade do sistema radicular. Para esta tese, serão consideradas apenas as características da altura da vegetação e área radicular das gramíneas envolvidas.

Isso posto, pode-se recorrer ao desenvolvimento e ao uso de simuladores de chuva (SC) para avaliar a influência de diferentes coberturas vegetativas e suas raízes na infiltração e na geração do escoamento superficial de solos vegetados e não saturados, com possibilidade de entender também como ocorrem as mudanças geotécnicas envolvidas.

2.5 SIMULADORES DE CHUVAS

Conforme Morin *et al.* (1967) e Sousa Júnior (2011), os simuladores de chuva (SC) podem ser classificados em dois grandes grupos: os simuladores dotados de dispositivos gotejadores (*drop-forming*) e os simuladores que possuem aspersores pressurizados (*pressurized nozzle simulators*). Ambos podem ser desenvolvidos para pesquisas de campo e experimentos em laboratórios.

Os SC do tipo gotejamento possuem a vantagem de serem equipamentos de fácil transporte e de apresentarem baixo custo de construção. Tais simuladores utilizam tubos capilares, tubos de polietileno ou agulhas hipodérmicas para formarem as gotas de chuva, como é o caso dos simuladores de chuva utilizados por Ribeiro *et al.* (2007) e Costa (2015). A intensidade da chuva é regulada com o controle da altura da lâmina de água acima dos dispositivos gotejadores. A desvantagem desses simuladores pode estar associada a: a) pequenas áreas de aplicação; b) entupimento dos elementos de gotejamento, que na maioria são agulhas hipodérmicas; c) necessidade de grande número de elementos gotejadores idênticos e espaçadamente iguais, para produção de chuvas uniformes, que em caso de manutenção, pode ser muito trabalhoso.

Os simuladores de chuva aspersivos produzem gotas a partir da pressão de serviço, podendo ser utilizados em laboratório e em campo para uma variedade de usos e faixa de intensidade de chuva. Uma vez que as gotas de água saem dos aspersores com uma velocidade maior que zero, estes tipos de simuladores necessitam de uma menor altura para alcançarem a velocidade terminal requerida fazendo com eles possam ser menores do que os primeiros, apesar de serem mais dispendiosos. Para esta pesquisa, será dada ênfase apenas a este tipo de simulador. A maioria dos SC possuem três partes principais, sendo elas a parte estrutural, a geração das chuvas e o monitoramento.

Vários são os autores que planejaram, desenvolveram, avaliaram e utilizaram os SC. Wilcox *et al.* (1986) desenvolveram um SC composto por um aspersor fixo Fulljet 1/4-G-10, fabricado pela *Spraying System Company* para ser utilizado em terrenos declivosos em área de 1m². Alves Sobrinho (1997) e Alves Sobrinho *et al.* (2008) também desenvolveram um SC aspersivo portátil, porém do tipo pendular com aplicação da chuva em formato de leque e avaliou diferentes modelos de aspersores (Veejet 80.70, 80.100 e 80.150) em variadas configurações. Cerdá *et al.* (1997) desenvolveram um SC composto por um aspersor fixo ou móvel Hardi-1553-10 para pesquisas de campo em regiões semiáridas. Sousa Júnior *et al.* (2017) desenvolveram um SC composto por dois aspersores fixos Fulljet 1/2-HH-SS-40, também da *Spraying System Company*, acionados automaticamente pela plataforma Arduíno para controle e monitoramento da aplicação de chuvas (controla a abertura e o fechamento das válvulas solenóides dos aspersores) e sensores para medições de umidade e vazões (Figura 2.9a). O SC construído é capaz de reproduzir intensidades de chuva com períodos de retorno de até 10 anos e duração de até 60 min, para uma área de 3 m², sendo adotada a equação da chuva (*i-d-f*) para Goiânia – GO. Porém, não são descritos os aspectos geotécnicos iniciais e modificados do solo pelo uso do SC.

Já o SC da Figura 2.9b apresenta maior número de aspersores (mini-aspersores). Seu uso é laboratorial e, além de ser totalmente automatizado (aplicação de chuvas, medições de umidade e vazões), também é possível controlar a inclinação do solo. Foi utilizado para diferentes tipos de solo utilizando amostras deformadas e compactadas, porém, detalhes sobre as condições de aplicação das chuvas são apresentadas de forma simplificada (Pulat, 2010; Egeli & Pulat, 2011).



Figura 2.9. Modelos de SC aspersivos: a) Sousa Júnior *et al.* (2017); b) Egeli & Pulat (2011).

Outras configurações muito conhecidas de SC automatizados e monitorados para estudos geotécnicos são o modelo Hele-Shaw utilizado por Miyazaki (2005) para estudo de fluxo de água em solos saturados e não saturados (Figura 2.10a) e modelos com realimentação (Figura 2.10b) utilizado por Römken *et al.* (2001).

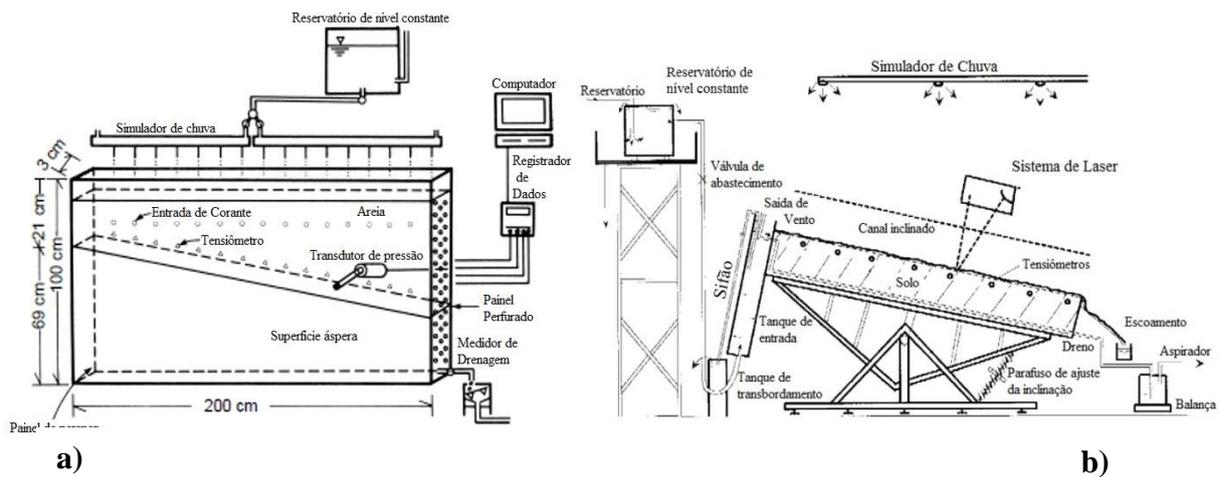


Figura 2.10. Outros modelos de SC aspersivos utilizados em estudos geotécnicos: a) Miyazaki (2005); b) Römken *et al.* (2001).

A Tabela 2.3 apresenta uma síntese de informações técnicas sobre os SC aspersivos e as características de chuvas simuladas por diferentes autores obtidas na literatura acadêmica sob a perspectiva hidrológica e que auxiliou na escolha e na definição do aspersor mais adequado para ser utilizado no SC desenvolvido nesta pesquisa.

Tabela 2.3. Principais características técnicas de alguns SC e das chuvas simuladas por diferentes autores (baseada em Abudi *et al.*, 2012)

Projetista	Tipo de Simulador	Marca e tipo aspersor utilizado	Intensidade da chuva simulada (mm/h)	Altura de aplicação da chuva (m)	Pressão (bar)	Vazão (m ³ /h)	Velocidade terminal das gotas (m/s)	Diâmetro das gotas (mm)	Unif. da chuva Christiansen (CUC)	Fluxo de energia (J/mm.m ²)	Área de Simulação (m ²)
Morin <i>et al.</i> (1967)	1 Bocal aspersor (rotativo)	Spraying Systems Fulljet 1 1/2" H 30	29 – 142**	2,0	0,6	7,2		1,5 - 2,25	0,8 - 0,9	16,0 – 22,0 conforme tamanho da gota	1,75
Meyer e Harmon (1978)	1 Bocal aspersor (oscilante)*		10 - 140				8,8	1,5 - 2,5	-	20,0 – 27,0 conforme tamanho da gota	2,54
Miller (1987)	3 Bocais aspersores com válvulas solenóides (fixos)*		43 - 116					2,25 - 2,5	0,83	23,1	3,00
Cerda <i>et al.</i> (1997)	1 Bocal aspersor (fixo)*		10 - 60**				3,4	2,53 p/ 54,6 mm/h	0,93 p/ 54,6 mm/h	7,1 p/ 54,6 mm/h	0,24
Assouline <i>et al.</i> (1997)	1 Bocal aspersor (fixo p/ cima)*		12** 20** 28**					1,17 ⁺ 1,21 ⁺ 1,34 ⁺	0,85	Muito perto de 13,0	16,00
Montebeller <i>et al.</i> (2001)	2 Bocais aspersivos por linha (rotativo)*	Spraying Systems Veejet 80.100, 80.150	34,2 – 42,5** 52,1 – 53,6**	2,87	0,136; 0,204; 0,272; 0,340			1,5 – 3,6 ⁺⁺ 1,9 – 3,9 ⁺⁺	0,29 – 0,88 0,31 – 0,84	± 75% EC_N	1,0
Blanquies <i>et al.</i> (2003)	1 Bocal aspersor (oscilante)*		-					1,71 ⁺	-	-	3,50
Souza (2004)	1 Bocal aspersor (oscilante)*	Spraying Systems Veejet 80.100	47	3,0	0,413					20,0	1,0
Alves Sobrinho <i>et al.</i> (2008)	2 Bocais aspersivos por linha (rotativo)*	Spraying Systems Veejet 80.70, 80.100, 80.150	19 - 308	2,0	0,356			1,5 – 1,8 ⁺⁺ 1,8 – 3,0 ⁺⁺ 1,8 – 3,0 ⁺⁺	0,82 – 0,87	± 90% EC_N	0,70
Abudi <i>et al.</i> (2012)	1 Bocal aspersor com válvula solenóide (rotativo)*	Spraying Systems. Fulljet 1 1/2" H 30	30	2,0	0,6	7,2	4,4	1,50 ⁺⁺ 1,98 ⁺ 1,82 ⁺⁺⁺	0,92 0,98	9,9 15,0	2,00 ~7,00
Spohr <i>et al.</i> (2015)	1 Bocal aspersor (oscilante)*	Spraying Systems Veejet 80.100	63 – 106**	2,9	0,2 – 0,4			2,3 ⁺	0,80 – 0,84	± 84% EC_N	1,2
Sousa Júnior <i>et al.</i> (2017)	2 Bocais aspersores (fixos)	Spraying Systems Fulljet 1/2" HH SS 40	40 – 182**	2,80	0,8		8,38	2,12 ⁺	0,68 – 0,90	22,53	3,0

*Simulador portátil (sem asterisco o simulador não é portátil); **Chuva contínua (sem asterisco o processo de formação da chuva é do tipo pulsada); EC_N significa energia cinética da chuva natural; ⁺Diâmetro médio das gotas de chuva (Técnica do papel filtro ou método da farinha); ⁺⁺D₅₀; ⁺⁺⁺Diâmetro médio das gotas de chuva (Câmara de alta precisão);

3. MODELAGEM NUMÉRICA DO SIMULADOR DE CHUVA

Simuladores de chuva (SC) são desenvolvidos para estudar a infiltração, geração de escoamento e processos de erosão. Vários projetos de SC estão disponíveis, mas pouca atenção tem sido dada aos efeitos da escala do equipamento e às condições iniciais, de contorno e fronteira no escoamento medido. Este capítulo apresenta uma avaliação baseada em modelo do SC usando solução de elemento finito para a equação de Richard e uma nova condição de fronteira da superfície do solo projetada para acomodar o comportamento do solo não saturado. As propriedades hidráulicas de dois solos tropicais de Goiânia, GO, Brasil foram consideradas, juntamente com múltiplas combinações de conteúdos iniciais de água, dimensões da amostra e ângulos inclinados.

3.1 INTRODUÇÃO

O escoamento superficial do solo é uma variável primária associada à evolução da paisagem. O estudo do escoamento superficial, do coeficiente de escoamento superficial (C) e dos processos de erosão envolve numerosas variáveis e complexos processos associados ao comportamento da infiltração, e zona vadosa. O escoamento depende das propriedades do solo, das condições da superfície do solo e subsuperfície e das características meteorológicas. A interação do solo e condições climáticas é dinâmica e varia no tempo e no espaço. No entanto, as avaliações de escoamento utilizadas na prática são predominantemente baseadas em abordagens simplificadas (Young *et al.*, 2009).

A necessidade de substituir estimativas empíricas de coeficiente de escoamento por dados experimentais de laboratório e de campo mais precisos é ditada pelo tipo e pela escala do problema. Valores mal representativos do coeficiente de escoamento superficial, C , podem resultar em hidrogramas imprecisos, erros no cálculo das condições de umidade da subsuperfície necessárias para avaliações de estabilidade de encostas e má estimativa da erosividade (Sen, 2008).

Uma medida direta do escoamento pode ser obtida por meio de um aparelho de escoamento superficial, também referido na literatura como modelo físico ou simulador de chuva (SC). Um SC deve reproduzir, sob um ambiente controlado de laboratório, condições pluviométricas e geotécnicas com características semelhantes às encontradas no campo. Essa representação precisa das condições *in situ* devendo considerar as numerosas variáveis envolvidas, tais como

umidade antecedente inicial, tipo e espessura do solo, características da superfície nua ou da cobertura vegetal, inclinação da superfície, entre outros.

Vários autores projetaram e avaliaram diferentes tipos de SC para diferentes áreas de estudo: pesquisa agrícola (Montebeller *et al.*, 2001); estudos de infiltração (Shao & Baumgartl, 2014; Rahardjo *et al.*, 2016); hidrologia urbana, em particular relacionada com pavimentos permeáveis (de Araújo *et al.*, 2000, Silva, 2006; Castro, 2011) e estudo da qualidade da água de escoamento de pavimentos e telhados (Egodawatta, 2007, Egodawatta *et al.*, 2007, 2009; Minguntanna, 2009), todos usando SC desenvolvido por Herngren (2005). Os SC também são usados para avaliar a erosão do solo (Poesen *et al.*, 1994; Römken *et al.*, 2002; Sky, 2011; Zhang *et al.*, 2014; Sadeghi *et al.*, 2015; Wang & Lai, 2018; Liu *et al.*, 2019), escorregamentos e estabilidade de taludes (Egeli & Pulat, 2011; Cecconi *et al.*, 2015, Montrasio *et al.*, 2016) e infiltração em solos insaturados, considerando fluxo subsuperficial (Miyazaki, 2005; Montoya-Dominguez *et al.*, 2017).

Existem numerosos trabalhos em relação às características das chuvas simuladas. Estes estudos têm lidado com os limites e as tolerâncias permitidas quanto a uniformidade e diâmetros das gotas de água e a velocidade e energia cinética da chuva (Abudi *et al.*, 2012; Spohr *et al.*, 2015; Sousa Júnior *et al.*, 2017, Kim *et al.*, 2018). Enquanto isso, as pesquisas sobre a avaliação dos efeitos de escala em SC foram apresentadas por Martinez *et al.* (2017), Liu *et al.* (2019) e Langhans *et al.* (2019), entre outros. Também é importante notar que a maioria dos estudos emprega SC de campo em vez de equipamentos de laboratório. Uma variedade de condições foi considerada em estudos *in situ* anteriores, tais como terra coberta por cascalho (Poesen *et al.*, 1994), lavoura (Sadeghi *et al.*, 2015), vegetação (Cerdan *et al.*, 2002, 2004; Mingguo *et al.*, 2007), vários tipos de cobertura (Smets *et al.*, 2008a, 2008b) e superfície do solo nu (Fu *et al.*, 2011).

A Figura 3.1 apresenta uma visão geral dos componentes de fluxo em um SC. Uma taxa de precipitação temporal e espacialmente uniforme, P_P [$L^3L^{-2}T^{-1}$], é geralmente aplicada a uma amostra cujas características (condições iniciais e propriedades internas e superficiais) são representativas das condições *in situ*. A inclinação da superfície da amostra é determinada por α_D . Durante o evento de precipitação, a infiltração e o escoamento podem ser produzidos. A taxa de infiltração pontual, I_P [$L^3L^{-2}T^{-1}$], e a taxa de escoamento pontual, R_P [$L^3L^{-2}T^{-1}$], geralmente são variáveis temporais e espaciais não uniformes que correspondem às taxas de fluxo em qualquer ponto. Observe que os SC são capazes de medir somente o escoamento

acumulado gerado em toda a superfície da amostra. Portanto, a interpretação dos resultados depende da uniformidade espacial do escoamento gerado e os efeitos de escala tornam-se questões importantes.

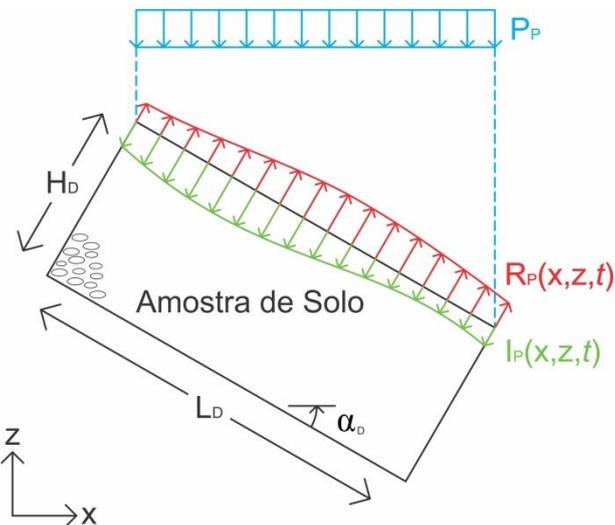


Figura 3.1. Visão geral dos componentes de fluxo em um SC. Fonte: Mendes *et al.* (2020).

Os SC existentes são projetados com base em observações empíricas. Há uma aparente falta de detalhes em relação ao processo de projeto e pouco esforço foi direcionado para a otimização da geometria do SC. Nenhum dos estudos aqui citados estabeleceu condições ideais de teste ou utilizou o desenho auxiliado por computador, baseado na modelagem numérica da interação chuva-vazão. Algumas das principais variáveis de interesse são as características da precipitação simulada e os efeitos de escala e limite. A adequação do SC também deve considerar parâmetros de teste em condições iniciais de umidade variáveis. As medições do escoamento podem depender da espessura da amostra do solo na distância dos limites do corpo de prova, na uniformidade do conteúdo inicial de água e, finalmente, na uniformidade da distribuição do escoamento gerado ao longo da superfície da amostra. Essas variáveis precisam ser cuidadosamente avaliadas para que os resultados dos testes sejam adequadamente interpretados, garantindo a representatividade dos coeficientes de escoamento obtidos.

Dentro do contexto do projeto experimental baseado em modelo, objetivou-se avaliar minuciosamente o comportamento teórico e o desempenho do SC em laboratório sob várias condições, usando um modelo abrangente e rigoroso de fluxo chuva-vazão. A sensibilidade do processo de escoamento às características físicas do SC e aos solos testados foi investigada. Atenção especial foi dada aos efeitos de escala e à determinação das dimensões mínimas da amostra (ou seja, comprimento e altura) necessárias para representar as condições de campo.

Finalmente, a maneira como os resultados dos testes foram interpretados e avaliados, considerando as características de projeto dos dispositivos.

3.2 MODELAGEM TEÓRICA DE TESTES DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

A avaliação do comportamento dos SC apresentados neste trabalho é baseada em um modelo mecanicista e fenomenológico de escoamento de água sob condições insaturadas e saturadas. As equações que regem o fluxo de água são combinadas com condições de fronteira especialmente desenvolvidas para representar as taxas de precipitação, infiltração e escoamento. As taxas de infiltração e escoamento são baseadas em uma relação não linear mecanicista que considera a pressão da água no poro na superfície do solo que, por sua vez, depende da taxa de precipitação e da capacidade do solo de permitir a infiltração. As seções a seguir apresentam a abordagem adotada em detalhes.

3.2.1 Fluxo de água em meios saturados e insaturados

O fluxo de água através do solo durante um teste de escoamento pode ser representado por uma equação diferencial parcial (EDP) que é obtida combinando a equação diferencial de conservação da massa de água, lei de fluxo de Darcy-Buckingham e uma equação constitutiva descrevendo o volume de água armazenada no solo. Considerando condições bidimensionais, a seguinte equação é obtida (Fredlund *et al.*, 1993):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k(\theta_w) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta_w) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] = - \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (3.1)$$

onde $k(\theta_w)$ é a função condutividade hidráulica [$L^3L^{-2}T^{-1}$], θ_w é o conteúdo volumétrico de água no solo [L^3L^{-3}], ϕ é a carga hidráulica total [L], $\phi = u_w/\gamma_w + z$, u_w é a poropressão da água [$ML^{-1}T^{-2}$], z é a elevação [L], γ_w é o peso específico da água [$ML^{-2}T^{-2}$] e t é o tempo [T]. A pressão do ar foi assumida constante e o solo considerado isotrópico.

Essa equação é equivalente à conhecida equação de Richard e segue os mesmos princípios e hipóteses. A equação governante é apresentada usando a carga hidráulica total como a variável primária. São necessárias duas propriedades não-lineares do solo, ou seja, a função de condutividade hidráulica e a curva característica solo-água. Uma variedade de funções de ajuste ou previsão pode ser empregada para representar essas propriedades, tais como aquelas propostas por Burdine (1953), Brooks & Corey (1964), Mualem (1976), van Genuchten (1980),

Fredlund & Xing (1994) e Fredlund *et al.* (1994). A adequação de qualquer função de propriedade selecionada depende do tipo de solo.

Para este estudo, foi adotada a equação de curva característica solo-água proposta por Gitirana & Fredlund (2004), juntamente com a equação de Brooks & Corey (1964) para a predição da função de condutividade hidráulica. Os tipos de solo considerados no estudo deste capítulo são apresentados posteriormente.

3.2.2 Condição de fronteira da superfície do solo

A equação que rege o fluxo interno saturado/insaturado deve ser resolvida considerando a condição limite na superfície do solo. A condição limite deve considerar o equilíbrio do fluxo de água na superfície do solo, como segue:

$$P_p \cos \alpha_D = I_p + R_p \quad (3.2)$$

onde P_p é a taxa de precipitação que atinge a superfície do solo em um determinado ponto [LT^{-1}], α_D é a inclinação da superfície [$^\circ$], I_p é a taxa de infiltração do solo naquele dado ponto [LT^{-1}] e R_p é a taxa de escoamento superficial no ponto [LT^{-1}].

No contexto da equação diferencial parcial governante, as dimensões de P_p , I_p e R_p correspondem aos valores da taxa de fluxo calculados sobre uma área infinitesimal tomada em torno de um ponto P . Essas taxas de fluxo são referidas aqui como valores pontuais e podem variar com a posição na superfície do solo.

Assume-se que o efeito da evapotranspiração pode ser negligenciado durante um evento de precipitação. Também é importante notar que o balanço hídrico expresso pela Equação 3.2 não é um balanço de reservatório, como é usualmente considerado, mas um equilíbrio local de taxa de superfície.

O balanço hídrico na superfície do solo requer o conhecimento de dois dos seus três componentes de fluxo. Assumindo que P_p e α_D são conhecidos, I_p ou R_p também devem ser estabelecidos. A abordagem geral de modelagem adotada neste estudo considera que o balanço hídrico pode ser determinado pelo cálculo de I_p usando a seguinte equação condicional:

$$\begin{cases} I_P |_{n+1} = P_P |_{n+1} \cos \alpha_D & \text{se } u_{w,gs} |_n \leq \gamma_w d_P \\ u_w |_{n+1} = \gamma_w d_P & \text{se } u_{w,gs} |_n > \gamma_w d_P \end{cases} \quad (3.3)$$

onde n e $n+1$ referem-se a passos de tempo consecutivos e $u_{w,gs}$ é a poropressão da superfície do solo, γ_w é o peso específico da água [$ML^{-2}T^{-2}$] e d_P é a profundidade (altura da lâmina de água) de empoçamento permitida na superfície do solo [L]. Um empoçamento (altura da lâmina de água na superfície do solo) igual a zero pode ser assumida, dependendo das condições de drenagem da superfície.

Uma condição de fronteira natural (isto é, taxa de infiltração) é aplicada à superfície do solo desde que a pressão da água dos poros na superfície do solo seja igual ou inferior à profundidade máxima especificada para a lâmina de água permitida na superfície do solo. Durante a integração numérica das equações governantes, assim que a pressão da água do poro da superfície do solo atingir valores limites para um determinado intervalo de tempo, a condição de fronteira é modificada para uma condição do tipo *Dirichlet*, impondo $u_w = \gamma_w d_P$. A taxa de fluxo é obtida usando a equação de Darcy e os gradientes produzidos na superfície do solo. Finalmente, tendo obtido P_P e I_P , a taxa de escoamento superficial no ponto pode ser computada usando a Equação 3.2.

A base física condicional da condição de fronteira apresentada pela Equação 3.3 é sólida. Infelizmente, apresenta pelo menos duas limitações. Primeiro, uma vez que a pressão da água dos poros da superfície do solo atinge zero, tal condição de fronteira nunca permitiria o retorno a uma taxa de fluxo imposta. Uma vez aplicada a condição de fronteira de *Dirichlet*, o sistema nunca retornaria à condição de fronteira natural, porque seria impossível que as pressões da água dos poros diminuíssem na superfície do solo. Observe que as taxas atuais de precipitação que reduzem com o tempo podem resultar em um retorno às pressões negativas de poros e água. Em segundo lugar, tal condição limítrofe impõe uma descontinuidade no tempo que pode produzir erros no balanço hídrico.

Uma condição de fronteira equivalente que elimina essas duas limitações foi proposta por Gitirana Jr. (2005) e é adotada neste estudo. A condição de fronteira é representada pela seguinte equação:

$$I_p \Big|_{n+1} = P_p \Big|_{n+1} \cos \alpha_D \frac{\arctan \left[\lambda \left(\gamma_w d_p - u_{w,gs} \Big|_n \right)^3 \right]}{\pi/2} \quad (3.4)$$

onde λ controla a transição suave entre taxas de infiltração positivas e negativas, como mostrado na Figura 3.2. Quanto maior o valor de λ , mais abrupta será a transição. Durante um evento de precipitação, a taxa de precipitação é aplicada à superfície do solo desde que valores positivos de $d_p - u_{w,gs}$ estejam ocorrendo. Assim que os valores negativos de $d_p - u_{w,gs}$ são obtidos para qualquer intervalo de tempo, um fluxo negativo é aplicado, removendo o excesso de volume de água e a pressão da água nos poros do solo. Isso resulta em um comportamento oscilatório controlado que segue a base física originalmente representada pela Equação 3.3 enquanto produz uma melhor estabilidade e balanço hídrico, como mostrado por Gitirana Jr. (2005).

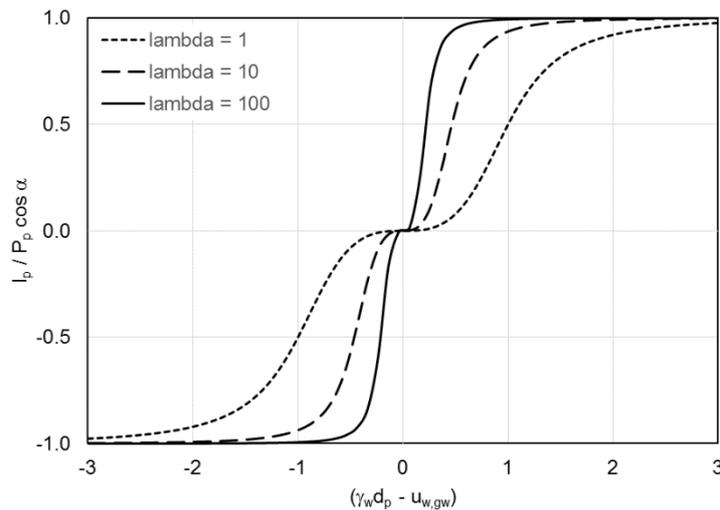


Figura 3.2. Taxa de infiltração normalizada em função da pressão da água nos poros da superfície do solo.

Essa condição de fronteira pode ser usada com esquemas de integração de tempo explícito ou implícito. Os benefícios usuais do uso de esquemas implícitos associados a uma solução de *Newton-Raphson* para o sistema não linear de equações são particularmente importantes quando esse tipo de condição de fronteira condicional é usada. Portanto, o esquema implícito foi adotado neste estudo.

3.2.3 Volumes totais de fluxo e coeficiente de escoamento superficial da interação solo-atmosfera

Os volumes totais de precipitação, infiltração e escoamento podem ser obtidos integrando os valores de taxa de fluxo ao longo da superfície (s) do solo e intervalo de tempo (t):

$$Q_S = \int_s Q_P ds \quad (3.5)$$

$$Q_T = \int_t Q_S dt \quad (3.6)$$

onde Q_S é o fluxo instantâneo para uma dada superfície [L^3T^{-1}], Q_P é o fluxo em um ponto da superfície [$L^3L^{-2}T^{-1}$] e Q_T é o fluxo acumulado total sobre uma superfície em um intervalo de tempo [L^3].

Aplicando os mesmos procedimentos de integração, os valores de escoamento superficial do solo pontual, superficial e total (R_P , R_S e R_T , respectivamente) podem ser calculados da seguinte forma:

$$R_P = P_P \cos \alpha_D - I_P \quad (3.7)$$

$$R_S = P_S - I_S = \int_s P_P \cos \alpha_D ds - \int_s I_P ds \quad (3.8)$$

$$R_T = P_T - I_T = \int_t \int_s P_P \cos \alpha_D ds dt - \int_t \int_s I_P ds dt \quad (3.9)$$

Os coeficientes de escoamento superficial do solo correspondentes aos valores de fluxo no ponto, superfície e total (C_P , C_S e C_T , respectivamente) são definidos da seguinte forma:

$$C_P = \frac{R_P}{P_P} = \frac{P_P \cos \alpha_D - I_P}{P_P} = \cos \alpha_D - \frac{I_P}{P_P} \quad (3.10)$$

$$C_S = \frac{R_S}{P_S} = \frac{P_S - I_S}{P_S} \quad (3.11)$$

$$C_T = \frac{R_T}{P_T} = \frac{P_T - I_T}{P_T} \quad (3.12)$$

As várias definições de coeficiente de escoamento são úteis na interpretação dos resultados obtidos usando aparelhos de escoamento (simuladores de chuva). A adequação das medições

dos testes realizados em uma superfície e durante um intervalo de tempo pode ser investigada comparando valores simulados de escoamento superficial, pontual e total.

3.2.4 Solução das equações governantes

A solução para o modelo de fluxo do solo não saturado foi implementada usando o FlexPDE versão 6, que é um solucionador de equações diferenciais parciais de propósito geral (PDE Solutions, 2016). Gitirana Jr. (2005) e Silva Júnior (2015) também realizaram implementações similares de modelos sobre interação de fluxo na superfície do solo usando FlexPDE. O usuário deve desenvolver um *script* apresentando as equações governantes, o domínio, as condições de fronteira e as condições iniciais do problema. O FlexPDE constrói o modelo de elementos finitos, resolve o sistema de equações algébricas e habilita a saída gráfica. EDP de primeira e segunda ordem em condições estacionárias ou transientes e para problemas não lineares podem ser resolvidos. Sistemas de coordenadas cartesianas, cilíndricas e esféricas podem ser usados para problemas uni, bi e tridimensionais.

A forma geral mista da EDP governante da conservação de massa proposta por Celia *et al.* (1990) foi adotada. A equação diferencial parcial apresentada (Equação 3.1) foi acoplada com a condição de fronteira apresentada na Equação 3.4. A abordagem de ponderação residual de *Galerking* foi adotada para a solução de elementos finitos. Elementos triangulares de seis nódulos isoparamétricos foram utilizados para uma representação polinomial quadrática da variável primária. Um método *Green* de três passos foi utilizado para a integração temporal das equações dos elementos finitos. O método de *Newton-Raphson* foi aplicado para a solução do sistema não linear. Foram empregados procedimentos de refinamento automático de malha e passo no tempo disponíveis no FlexPDE (Figura 3.7b). O balanço de massa foi verificado em todas as análises e os erros obtidos foram sempre menores que 0,1%.

Todas as variáveis, parâmetros e caminhos utilizados na modelagem numérica do SC podem ser visualizados no fluxograma da Figura 3.3, com exceção da simulação da vegetação, que é assunto do Capítulo 6.

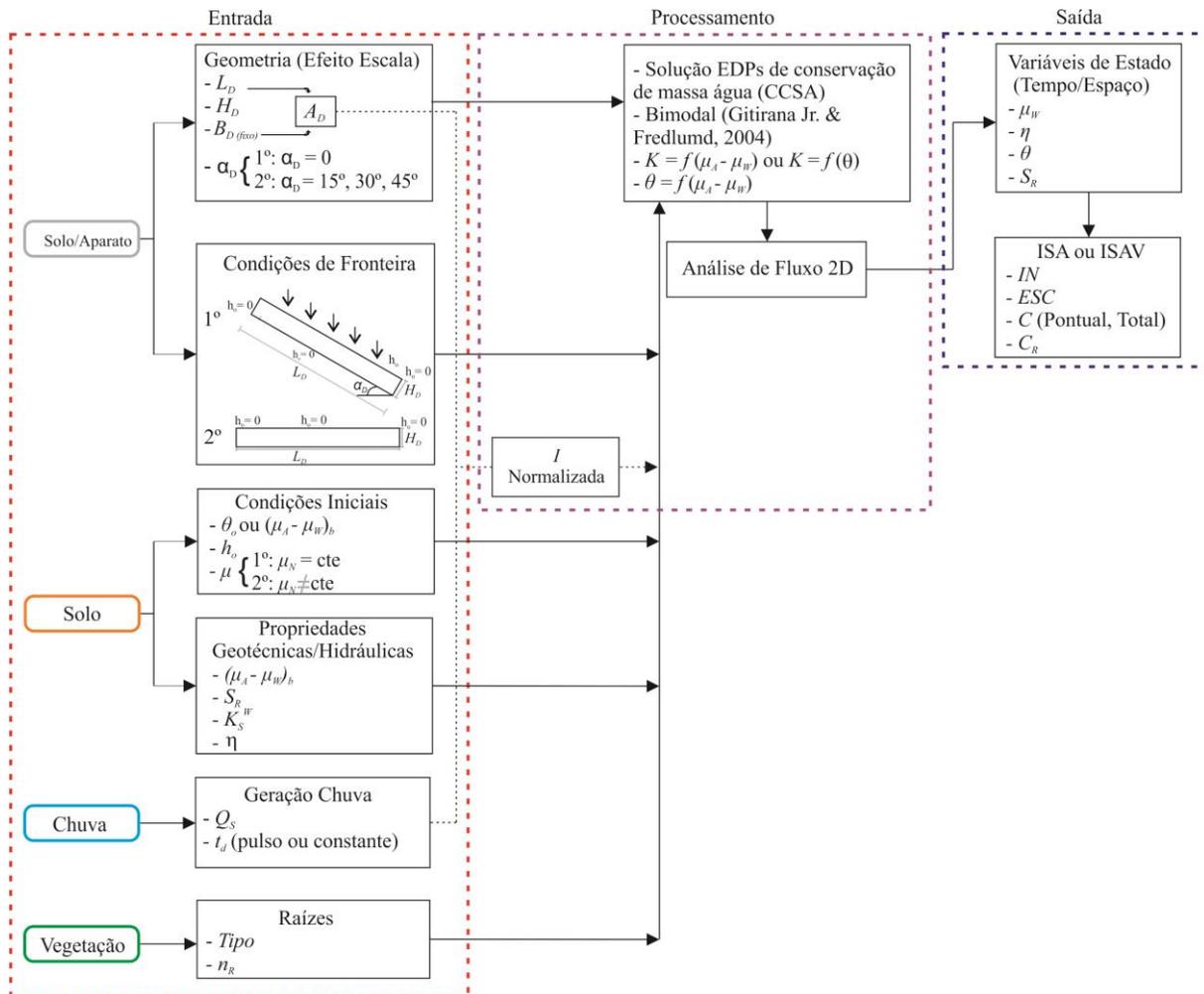


Figura 3.3. Fluxograma da implementação da modelagem numérica do SC no FlexPDE.

3.3 ANÁLISES PROPOSTAS

Um simulador de chuva (SC) deve ser projetado considerando conceitos e requisitos interdisciplinares, principalmente mecânicos, hidrológicos e geotécnicos. Do ponto de vista do hidrólogo, o coeficiente de escoamento superficial é mais comumente reconhecido como um valor médio ao longo de uma superfície relativamente grande. No entanto, do ponto de vista de um modelador geotécnico, o escoamento superficial é frequentemente visto como um valor local em qualquer ponto de uma dada superfície. Ambas as disciplinas podem se beneficiar de estudos e modelagens de pequena escala, pois permitem uma compreensão dos mecanismos físicos que controlam o fenômeno do escoamento superficial.

Para interpretar adequadamente o escoamento em escala local, são necessárias e desejáveis medições na superfície e na subsuperfície e interpretação numérica dos resultados. Assim, será demonstrado que a combinação de observações de superfície e subsuperfície fornece uma melhor compreensão dos fenômenos de interação do solo e condições climáticas.

O projeto básico inicial de um SC é mostrado na Figura 3.4 e segue as recomendações apresentadas por ASTM (2015). O SC deve ser composto por uma estrutura capaz de suportar a carga de amostra e impor inclinações de superfície variáveis que sejam convenientemente ajustáveis. O contêiner de amostra deve ser capaz de suportar a carga de amostra e o esforço de compactação no caso de materiais remoldados.

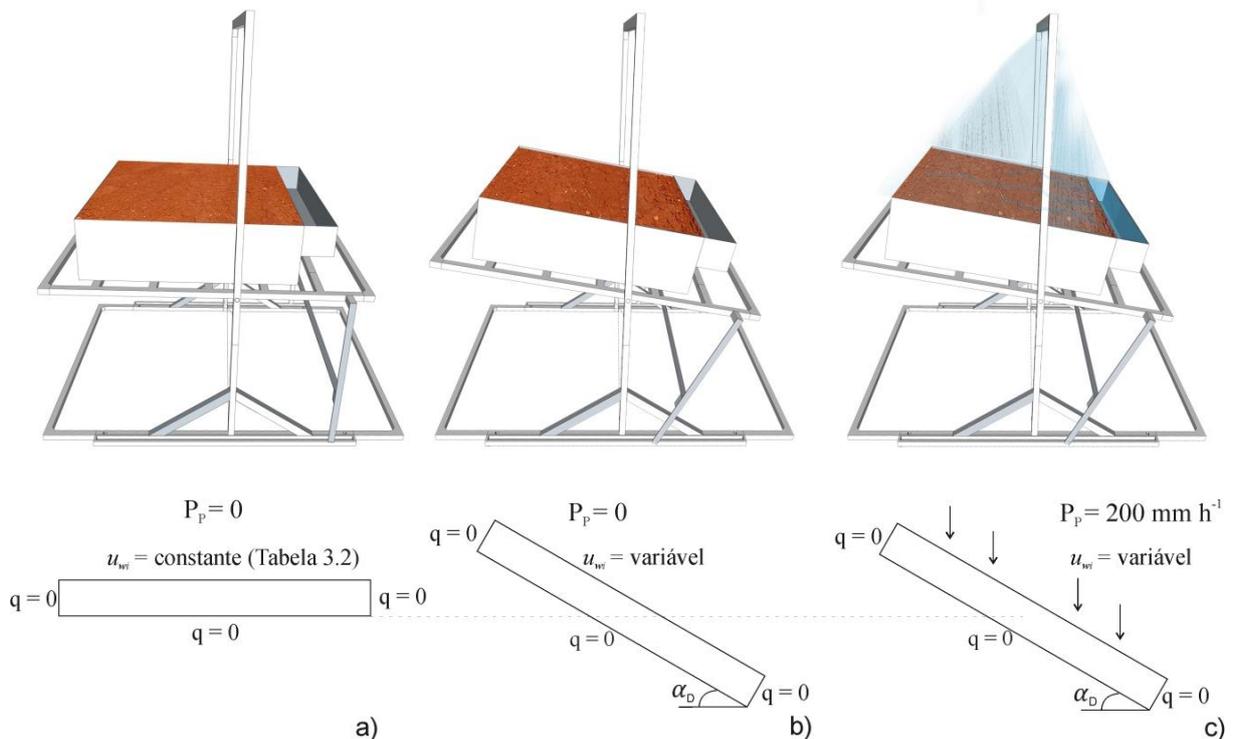


Figura 3.4. Diferentes cenários simulados e condições correspondentes de geometria, limite e inicial: a) estágio 1: configuração e equilíbrio das amostras; b) estágio 2: amostra inclinada antes da chuva; e c) estágio 3: simulação de chuva.

Os exercícios de análise numérica apresentados aqui têm como objetivo estabelecer o comportamento de uma amostra em termos de poropressões, grau de saturação e coeficiente de escoamento superficial. O comportamento da amostra será avaliado considerando as variações no comprimento da amostra, L_D e inclinações, α_D . Na Tabela 3.1 são apresentadas as variações na geometria do SC que foram utilizadas nos estudos paramétricos. As especificações de teste selecionadas são consideradas viáveis em condições laboratoriais típicas. Foi adotada uma intensidade de precipitação pluviométrica de $P_p = 200 \text{ mm h}^{-1}$, correspondente a uma precipitação extrema com duração típica de 20 min e período de retorno de 100 anos para a cidade de Goiânia, Goiás, Brasil. A Equação 3.4 foi usada como condição de fronteira para o topo da amostra. A Figura 3.4 mostra que as condições de fronteira adotadas para o fundo e os lados da amostra correspondem a superfícies impermeáveis ($q = 0$).

Tabela 3.1. Parâmetros de geometria e valores utilizados para avaliar o efeito da escala.

L_D [L]	H_D [L]	α_D [°]
0,5	0,15	15
1,0	0,30	30
2,0	0,50	45

Para realizar as simulações numéricas foi necessário estabelecer a curva característica solo-água e a função de condutividade hidráulica do solo. Dois solos tropicais diferentes de Goiânia, Goiás, Brasil foram considerados, ambos com curvas características solo-água bimodais. O primeiro material, denominado de solo 1 (S1), é um solo altamente intemperizado e permeável estudado por Araújo (2013). O segundo, denominado de solo 2 (S2), é um solo residual compactado estudado por Laguna (2015). As propriedades dos dois solos utilizados nas simulações numéricas são apresentadas na Tabela 3.2 e Figuras 3.5 e 3.6. As propriedades selecionadas oferecem uma ampla gama de possíveis características do solo, possibilitando avaliar o comportamento do SC sob diferentes condições.

Tabela 3.2. Propriedades hidráulicas e condições iniciais.

S_i (%)	S1 - Araújo (2013) $k_s^w = 8,0 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$		S2 - Laguna (2015) $k_s^w = 1,0 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$	
	u_{wi} (kPa)	k_i (m s^{-1})	u_{wi} (kPa)	k_i (m s^{-1})
50	- 7,0	$3,0 \times 10^{-7}$	- 9.500,0	$1,0 \times 10^{-11}$
75	- 3,8	$1,8 \times 10^{-6}$	- 900,0	$5,0 \times 10^{-9}$
100	- 2,0	$8,0 \times 10^{-8}$	- 90,0	$1,0 \times 10^{-7}$

k_s^w permeabilidade saturada, S_i grau de saturação inicial, u_{wi} poropressão inicial e k_i permeabilidade inicial.

As curvas características solo-água foram representadas usando análise de melhor ajuste, sendo a equação proposta por Gitirana Jr. & Fredlund (2004) a que melhor se ajustou. A função de condutividade hidráulica, $k(\theta)$, foi estimada usando a equação proposta por Brooks & Corey (1964), baseada na curva característica solo-água e o valor da condutividade hidráulica saturada, k_s^w (Figura 3.6). O modelo de predição foi aplicado utilizando um índice de distribuição do tamanho dos poros obtido para o primeiro ramo da curva. Essa primeira ramificação corresponde aos macroporos e é assumida como responsável pela maior parte do fluxo de água líquida.

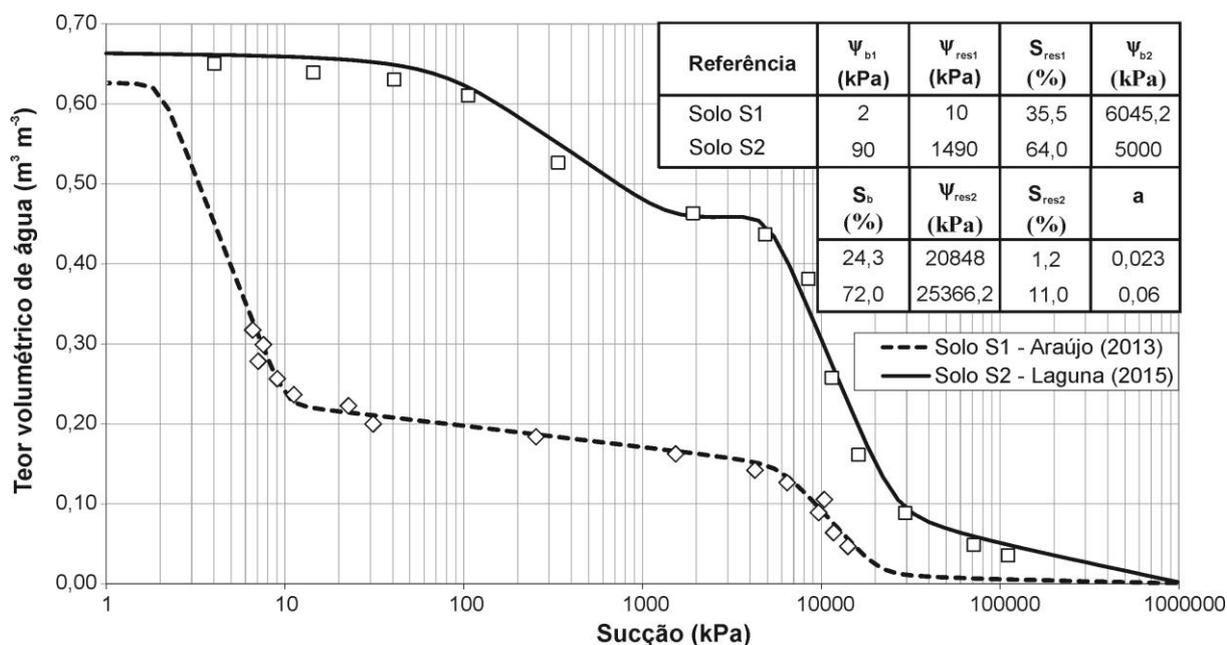


Figura 3.5. Curvas características solo-água utilizadas nas simulações numéricas.

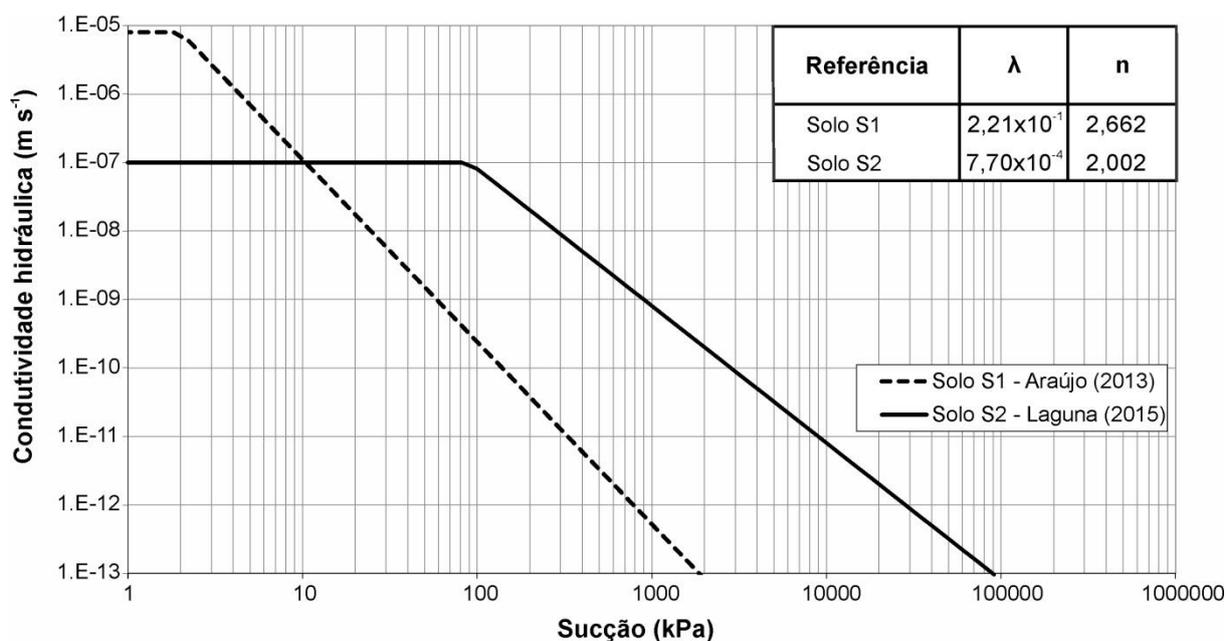


Figura 3.6. Funções de condutividade hidráulica modeladas.

O uso de SC requer estágios de teste para a configuração da amostra e simulação de chuva. É desejável interpretar todos os processos de fluxo de umidade que ocorrem durante a manipulação e a avaliação da amostra. Três estágios de testes comuns foram simulados, como mostrado na Figura 3.4:

- Estágio 1: configuração e equilíbrio da amostra (Figura 3.4a). Esta etapa só é relevante para solos remoldados que tenham um conteúdo de água uniforme logo após a preparação e configuração da amostra. O objetivo principal é avaliar o movimento da umidade devido à

gravidade e avaliar o tempo necessário para o equilíbrio. O tempo de equilíbrio foi definido como o tempo em que a diferença entre a carga hidráulica na parte inferior e no topo da amostra é menor que 0,01%. As condições iniciais selecionadas são apresentadas na Tabela 3.2 e correspondem a um conteúdo de água e poropressão constante, amostra horizontal ($\alpha_D = 0$) e nenhuma chuva ($P_P = 0$).

- Estágio 2: amostra inclinada antes da chuva simulada (Figura 3.4b). Avaliação das mudanças nas condições de equilíbrio geradas pela mudança da inclinação da amostra. O objetivo agora é avaliar quanto tempo o equilíbrio gerado no primeiro estágio seja significativamente alterado após a inclinação da amostra. O tempo de perturbação é definido como o tempo necessário para o desenvolvimento de uma variação de 10% nas poropressões ao longo da superfície da amostra no seu canto superior elevado. É importante enfatizar que o movimento da umidade devido ao declive da amostra pode interferir nas medições do escoamento superficial durante o próximo estágio de teste. A análise do estágio 2 demonstrará em quais cenários efeitos sobrepostos indesejáveis de precipitação e redistribuição de umidade devido à inclinação da amostra ocorreriam. Múltiplas dimensões e inclinações das amostras foram consideradas, conforme apresentado na Tabela 3.1. As condições iniciais de poropressões foram assumidas como hidrostáticas na posição horizontal da amostra.

- Estágio 3: simulação de chuva (Figura 3.4c). Uma vez que o equilíbrio hidráulico é alcançado no primeiro estágio, a precipitação ($P_P = 200 \text{ mm h}^{-1}$) é aplicada considerando as múltiplas condições iniciais e geometrias de amostra apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2. O coeficiente de escoamento superficial (C) é avaliado na microescala. A simulação de chuva é destinada a permitir a interpretação dos fenômenos do escoamento superficial e do coeficiente de escoamento superficial da água ao longo da superfície da amostra usando as Equações 3.10 até 3.12.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de avaliar a influência do comprimento das amostras (L_D), espessura (H_D), inclinação (α_D) e o grau inicial de saturação (S_i) na determinação do coeficiente de escoamento superficial do solo não saturado, foram realizadas análises paramétricas considerando alta intensidade de chuva ($P_P = 200 \text{ mm h}^{-1}$). A Figura 3.7 exemplifica a evolução de alguns parâmetros de análises ao longo de um dos cenários processados numericamente no FlexPDE, em especial, a geração da malha de elementos finitos e sua sofisticação à medida que a frente de molhagem avança em direção as camadas mais profundas da amostra de solo (Figura 3.7a e 3.7b). As simulações

numéricas foram executadas para dois tipos de solo (Tabela 3.2), de acordo com os três estágios de teste descritos anteriormente (Figura 3.4).

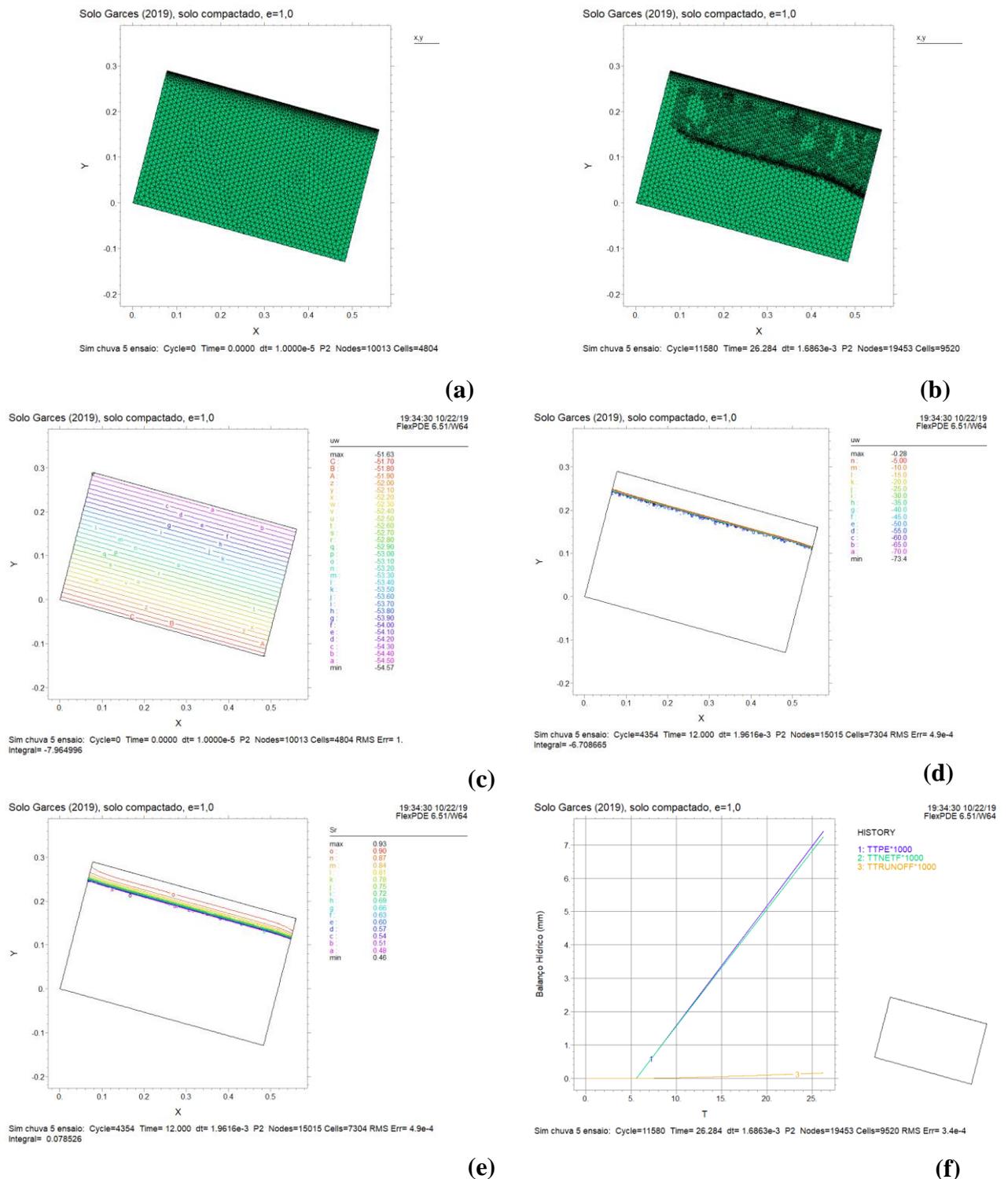


Figura 3.7. Exemplo dos dados de saída do modelo numérico: a) malha de elementos finitos inicial; b) malha de elementos finitos, tempo 26 min; c) poropressões iniciais; d) poropressões, tempo 12 min; e) grau de saturação, tempo 12 min e f) balanço hídrico, tempo 26 min, sendo TTPE a precipitação efetiva, TTNETF a infiltração e TTRUNOFF o escoamento superficial total.

3.4.1 Estágio 1

O comprimento da amostra não tem efeito sobre o movimento de umidade e tempo de equilíbrio para o estágio 1, porque com a amostra na posição horizontal, o problema é unidimensional. Portanto, apenas um comprimento de amostra ($L_D = 1,0$ m) foi considerado para a simulação e discussão dos resultados relacionados ao estágio 1. A Figura 3.8 ilustra as mudanças na sucção matricial e grau de saturação ao longo do tempo no topo da amostra. As curvas apresentadas foram escolhidas como representativas para todos os cenários.

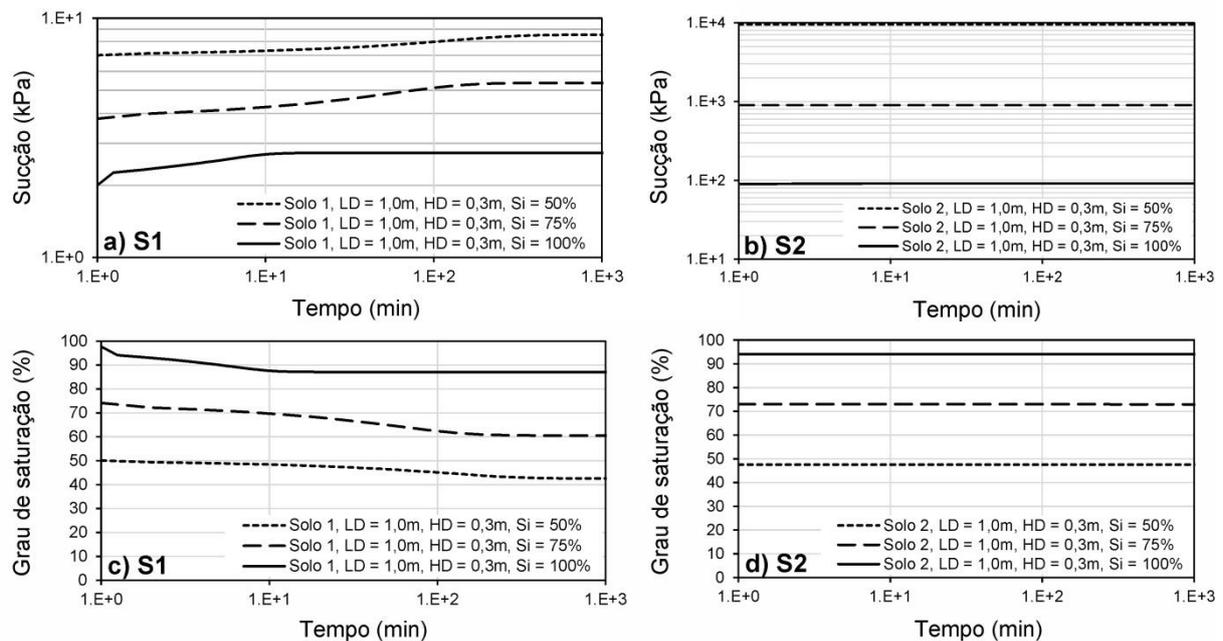


Figura 3.8. Estágio 1 – mudanças na sucção mátrica e grau de saturação no topo das amostras ($L_D = 1,0$ m $H_D = 0,3$ m).

Pode-se observar que o processo de equilíbrio hidráulico muda significativamente dependendo do tipo de solo e do grau inicial de saturação da amostra remodelada. As diferenças podem ser atribuídas principalmente ao valor de permeabilidade e entrada de ar de cada material. Os resultados mostram que materiais com menor grau de saturação, com menor permeabilidade média, requerem um período mais longo para atingir o equilíbrio. Isso é particularmente óbvio para o solo S1. As mudanças observadas no grau de saturação para o solo S1 significam que o período de equilíbrio no estágio 1 é necessário como preparação para os próximos estágios de teste.

O solo S2 não apresenta variação significativa na sucção matricial e no grau de saturação ao longo da superfície da amostra, como mostram as Figuras 3.8b e 3.8d. No entanto, as variações extremamente pequenas na sucção matricial e no grau de saturação levam muito tempo para se

desenvolver. Independentemente do tempo de equilíbrio, o processo de equilíbrio para o solo S2 envolve mudanças insignificantes no grau de saturação e não deve afetar o comportamento da amostra nos próximos estágios de teste. Isso significa que o estágio 1 poderia ser ignorado para o solo S2.

A Figura 3.9 resume os tempos de equilíbrio obtidos para os solos S1 e S2 em função da espessura da amostra e grau de saturação inicial, respectivamente. Para o solo S1, considerando a condição inicialmente saturada e o $H_D = 0,5$ m, o tempo de equilíbrio obtido é de apenas 50 min. Para $S_i = 75$ e 50%, os tempos de equilíbrio são atingidos em 26 e 48 h, respectivamente. Os tempos de equilíbrio obtidos podem ser considerados razoáveis para a preparação da amostra em um SC. Para o solo S2, os tempos de equilíbrio podem atingir valores que parecem inviáveis, mas o estágio 1 pode ser ignorado, conforme explicado anteriormente.

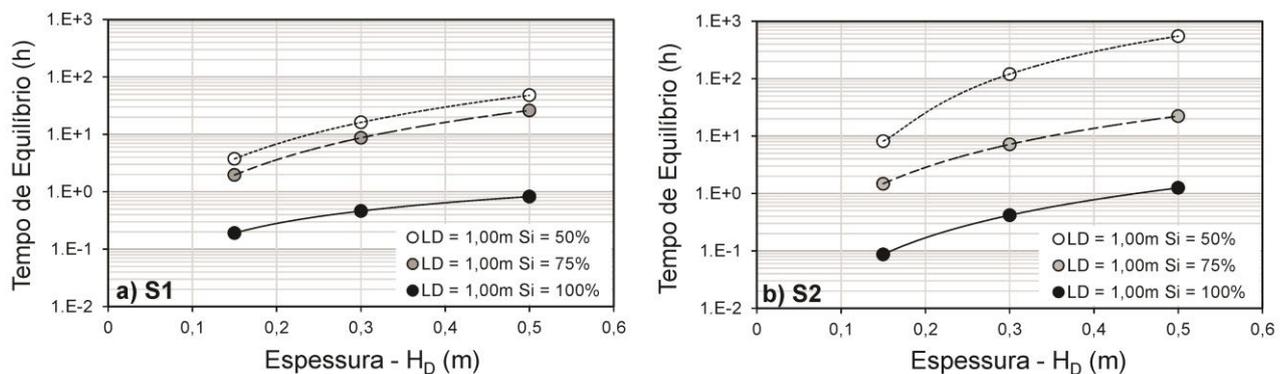


Figura 3.9. Estágio 1 - tempo de equilíbrio hidráulico para $L_D = 1,0$ m e diferentes valores de H_D e S_i .

O efeito da espessura da amostra e do grau inicial de saturação é perceptível. A espessura da amostra afeta os tempos de equilíbrio como resultado de caminhos de movimento de umidade mais longos. O grau inicial de saturação, por outro lado, controla a condutividade hidráulica insaturada inicial e média. Como resultado, amostras maiores e mais secas exigem tempos de equilíbrio significativamente mais altos.

Os principais resultados da análise do estágio 1 podem ser resumidos da seguinte forma: a) o processo de equilíbrio após a remodelagem da amostra deve considerar tanto o tempo necessário para o equilíbrio da umidade quanto a magnitude das variações do grau de saturação; b) quanto maior o tempo de equilíbrio requerido, menor a mudança prevista no grau de saturação e c) para os solos S1 e S2, um tempo de equilíbrio de 48 h seria adequado para todas as espessuras de amostra e graus iniciais de saturação.

3.4.2 Estágio 2

Devido à pequena influência do comprimento da amostra percebido no estágio 1, o próximo estágio também foi analisado apenas para $L_D = 1,0$ m. Os tempos de perturbação foram comparados com o tempo típico de simulação de chuva de uma hora. Um tempo de perturbação maior que uma hora implica que o estágio 3 (simulação de chuva) pode seguir o estágio 1 sem qualquer interferência causada pela inclinação da amostra. Tempos de perturbação baixos são obviamente indesejáveis e produziram condições de superfície heterogêneas durante o teste do estágio 3.

As Figuras 3.10 e 3.11 mostram que amostras de ambos os tipos de solo e com $S_i = 50\%$ ou inferior não sofreriam nenhum distúrbio na superfície após a inclinação da amostra para um período de pelo menos uma hora. Amostras com $S_i = 75\%$ também não apresentariam um movimento significativo de umidade durante um período de uma hora, exceto para o solo S1 com inclinação de 30° (para espessura 0,15 m) e 45° .

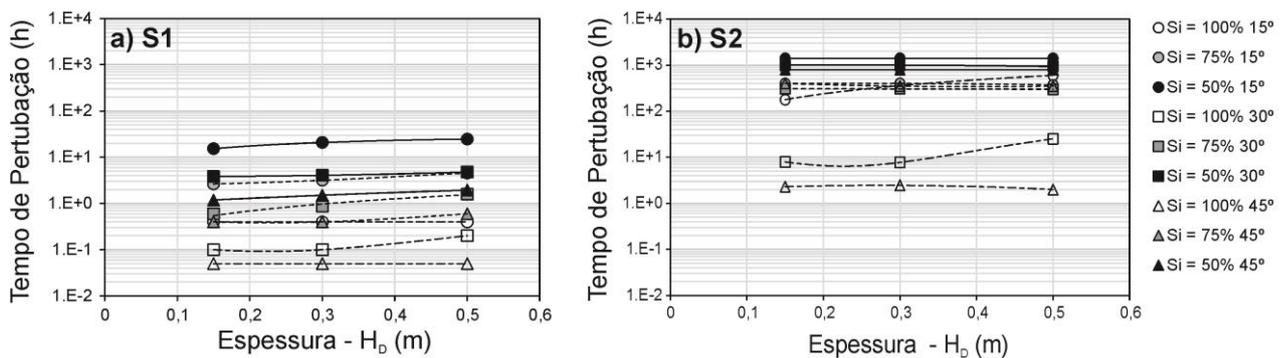


Figura 3.10. Etapa 2 - tempo para mudança de 10% na poropressão da superfície da amostra.

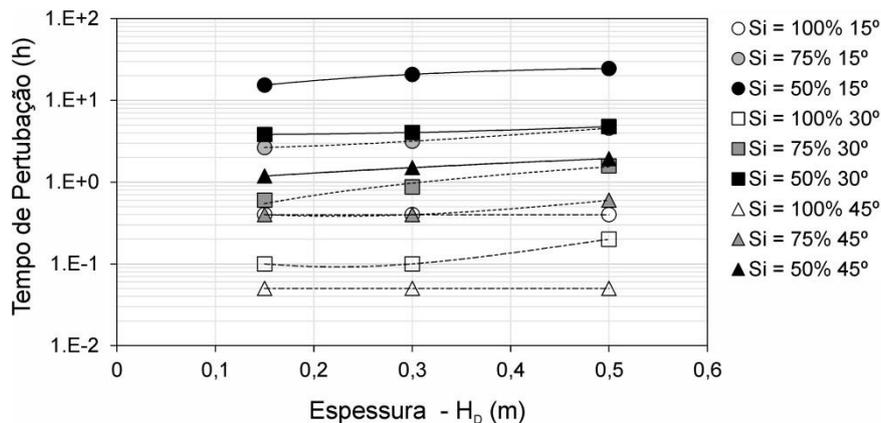


Figura 3.11. Etapa 2 - tempo para mudança de 10% no grau de saturação da superfície do solo S1.

Os resultados obtidos podem ser interpretados com base nas curvas características dos solos analisados (Figura 3.5). Variações relativamente pequenas de sucção no solo S1 podem causar

mudanças significativas no teor de água, dependendo de sua condição inicial. Por exemplo, uma inclinação de 45° para $L_D = 1,0$ m produz uma diferença máxima de elevação na superfície da amostra de 71 cm, resultando em uma sucção máxima de 7,0 kPa. Esse valor de sucção matricial, maior que o valor de entrada de ar de 2,0 kPa, é suficiente para remover a água dos macroporos.

Todas as simulações realizadas com o solo S2 apresentam tempos de perturbações extremamente longos e os resultados não foram plotados. A perturbação devido à inclinação do solo S2 resulta em mudanças insignificantes no grau de saturação, similar ao observado para o estágio 1. O comportamento do solo S2 após a inclinação da amostra pode ser justificado pelo seu valor de entrada no ar igual a 90 kPa. Os valores máximos de sucção produzidos quando o SC é inclinado são menores que o valor de entrada de ar, não permitindo a redistribuição de água na amostra. Menores graus iniciais de saturação de 75 e 50% obviamente correspondem a maiores sucções matriciais. Para esses cenários com menor grau de saturação, a perturbação desprezível observada se deve ao fato de que grandes variações na sucção matricial seriam necessárias para produzir mudanças significativas no conteúdo de água.

A condição de amostra com $S_i = 100\%$ não é usual em testes de infiltração/escoamento superficial em SC com condição de limite inferior fechado. A ausência de fluxo basal não permitiria qualquer infiltração adicional, resultando em $C = 1$ (condição de tanque cheio). No entanto, o cenário $S_i = 100\%$ foi considerado aqui para estabelecer uma condição de limitação de referência. As Figuras 3.10 e 3.11 mostram para o solo S1 e $S_i = 100\%$ redistribuição muito precoce da poropressão e grau de saturação, o que interferiria nos resultados do teste do estágio 3. Para o solo S2, apenas a condição mais inclinada parece apresentar perturbações significativas na superfície, como mostra a Figura 3.10b.

Em resumo, para a maioria das condições de teste típicas, considerando as características usuais do campo ($S_i \leq 75\%$), não haveria interferência dos processos de redistribuição de água devido à inclinação da amostra por um período de uma hora. Para o solo S2 não há possibilidade de mudanças significativas no grau de saturação devido à inclinação da amostra. No entanto, as condições de teste para o solo S1 devem ser consideradas com maior cuidado e podem exigir que o estágio 3 seja limitado a um período de tempo mais curto, como 30 min.

3.4.3 Estágio 3

Considerando que $S_i = 100\%$ não é representativo das condições normais de teste em SC e que os comportamentos de S_i iguais a 50 e 75% são semelhantes, o estágio 3 foi analisado apenas para $S_i = 50\%$. Comprimentos de amostras diferentes, espessuras e ângulos de inclinação (Tabela 3.1) foram considerados apenas para o solo S1, pois é o tipo de solo que será utilizado nos ensaios físicos (simulador de chuva).

A Figura 3.12 apresenta o comportamento do solo S1, considerando $H_D = 0,15$ m e $P_P = 200$ mm $h^{-1} = 3,33$ mm min^{-1} . As parcelas das amostras mostram um aumento rápido do grau de saturação no topo da amostra atingindo a saturação completa após aproximadamente três minutos. Um aumento tardio e ligeiramente mais lento do grau de saturação é observado na base da amostra.

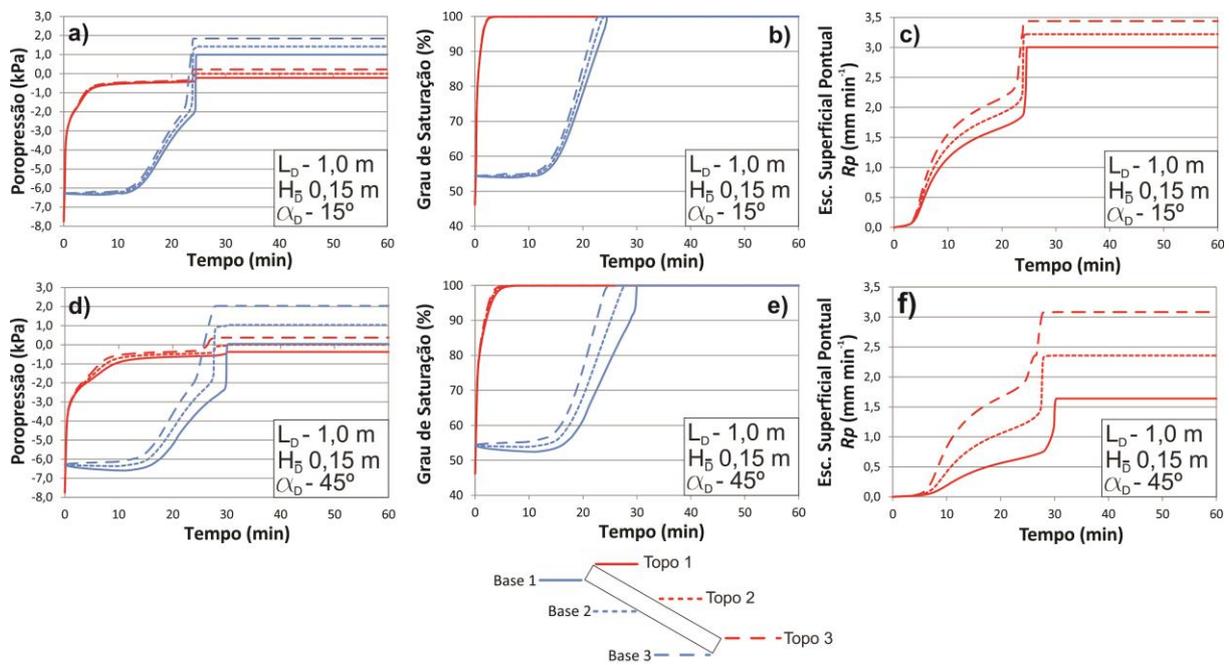


Figura 3.12. Estágio 3 - poropressões, grau de saturação e escoamento superficial pontual para $S_i = 50\%$ e $H_D = 0,15$ m.

A geração de escoamento superficial pode ocorrer de duas maneiras: a) quando a precipitação efetiva (P_P) é maior que a capacidade de infiltração superficial do solo (I_P), independentemente da influência do perfil ou estratificação do solo ou b) quando a capacidade de armazenamento do solo já tiver sido atingida (reservatório cheio). A primeira condição está relacionada à condutividade hidráulica da superfície e foi considerada por Green & Ampt (1911) e Horton (1933), entre outras, usando abordagens empíricas ou semi-empíricas. A segunda situação depende das características do perfil do solo. Condições locais complexas com camadas

altamente condutivas ou impermeáveis podem produzir diferentes condições de armazenamento e transmissividade interna. Um SC pode impor artificialmente uma condição de reservatório total indesejada se a espessura da amostra for pequena e o tempo de teste for relativamente longo. É importante notar que a espessura da amostra e a profundidade do fundo impermeável do SC são geralmente uma questão de conveniência. As dimensões do SC precisam considerar as dificuldades associadas a preparação, transporte e manipulação das amostras que são muito pesadas (cerca de 140 a 160 kg). Como resultado, é importante identificar quando e como a condição de limite inferior imposta afeta a avaliação do escoamento.

As curvas de escoamento mostradas na Figura 3.12c e 3.12f apresentam três características distintas de comportamento ao longo do tempo. Desde o início do teste até o tempo entre 3 e 7 min não há geração de escoamento superficial, pois o solo não saturado é capaz de infiltrar toda a precipitação simulada. Uma vez iniciado o escoamento superficial, ele aumenta gradualmente e tende a um valor de equilíbrio controlado pelos gradientes hidráulicos produzidos que tendem a valores constantes. No entanto, um terceiro fator que controla o escoamento é observado entre os tempos 25 e 30 min, respectivamente. Esses tempos correspondem ao momento em que a frente de infiltração alcança o fundo da amostra impermeável e não pode mais avançar.

A saturação completa na base da amostra coincide com uma taxa constante de escoamento máximo do ponto (R_P) nos três pontos da amostra observados. O valor médio de escoamento superficial pontual máximo pode ser calculado com base na precipitação e na inclinação da superfície, usando a Equação 3.7 e assumindo que não há infiltração. Para um valor de α_D de 15 e 45°, os valores médios de escoamento superficial pontual são 3,22 e 2,35 mm min⁻¹, respectivamente.

A Figura 3.12 mostra que, sob as condições impostas, amostras com espessura de apenas 0,15 m alcançam saturação completa abaixo de 30 min, influenciando os valores da geração de escoamento superficial (R_P) e conseqüentemente C_P . As condições de teste são influenciadas pela espessura da amostra e são representativas apenas em condições de campo específicas, onde o fluxo basal seria impedido pela presença de uma camada de baixa permeabilidade a uma profundidade de 0,15 m. Tais dimensões para amostras no SC podem não produzir valores de escoamento superficial representativos para outras condições de campo.

As Figuras 3.13 e 3.14 apresentam os resultados das análises de sensibilidade considerando $H_D = 0,3$ e $0,5$ m respectivamente, e as combinações de alguns dos parâmetros de geometria restantes apresentados na Tabela 3.1. Apenas os valores extremos de $L_D = 0,5$ e $2,0$ m são apresentados.

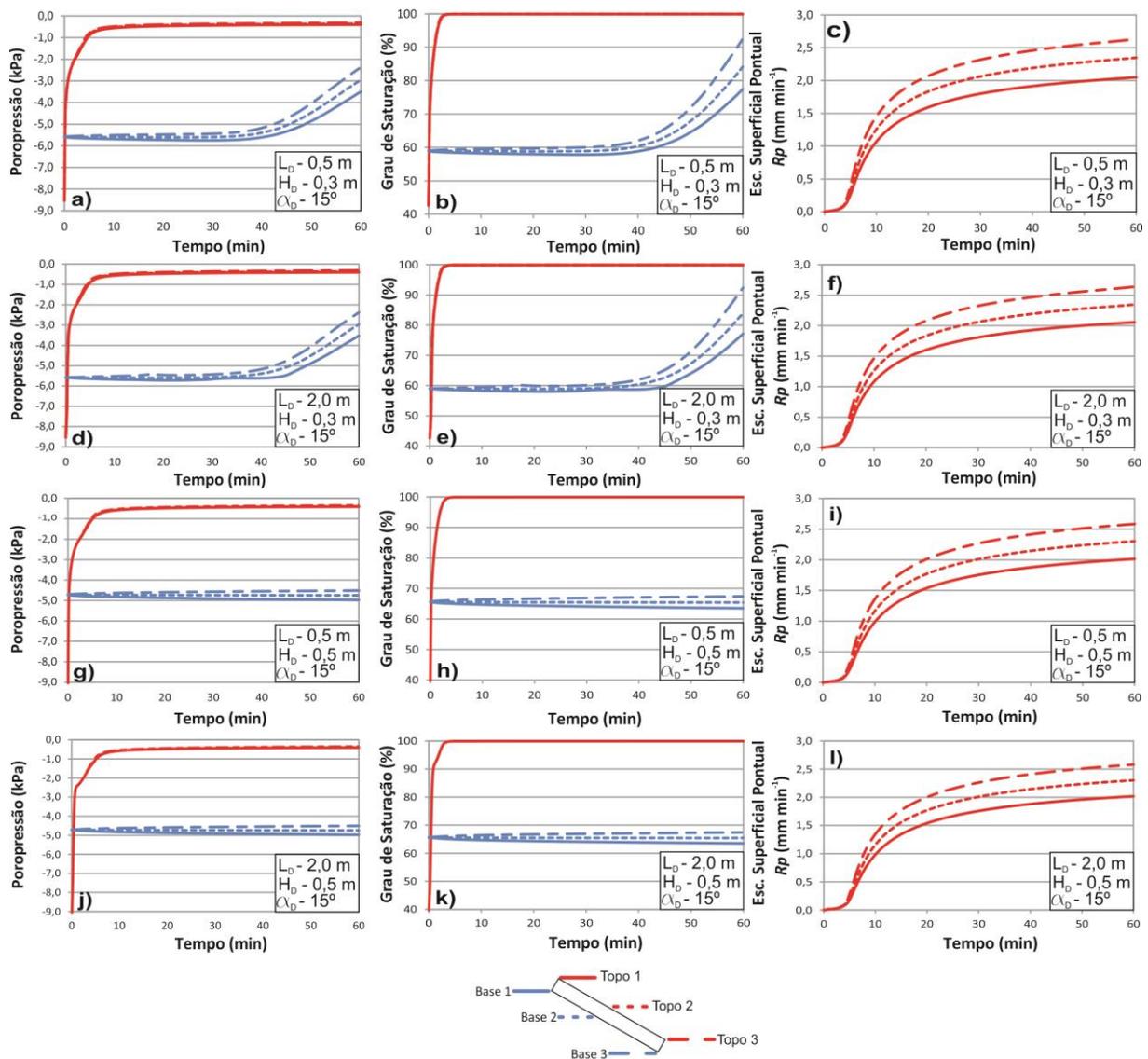


Figura 3.13. Estágio 3 - poropressões, grau de saturação e escoamento superficial pontual para $S_i = 50\%$, $\alpha_D = 15^\circ$ e $H_D = 0,3$ e $0,5$ m.

A influência da condição limite impermeável inferior não é mais observada para as amostras mais espessas. Pode-se observar também que o comprimento da amostra (L_D) não influenciou os resultados do teste e os valores do escoamento superficial (R_p). Os limites inferiores apresentaram algum aumento em seus graus de saturação para alguns cenários. No entanto, as condições de limite inferior não parecem influenciar a dinâmica do fluxo de umidade na superfície e os valores de escoamento superficial. Em resumo, os efeitos de escala não aparentam surgir dos valores selecionados de L_D , mas podem ser um problema para valores

pequenos de H_D . É importante enfatizar que essas observações são válidas apenas por um período de teste de 60 min. Períodos de teste mais longos ou mais curtos permitiriam ou exigiriam especificações de teste diferentes.

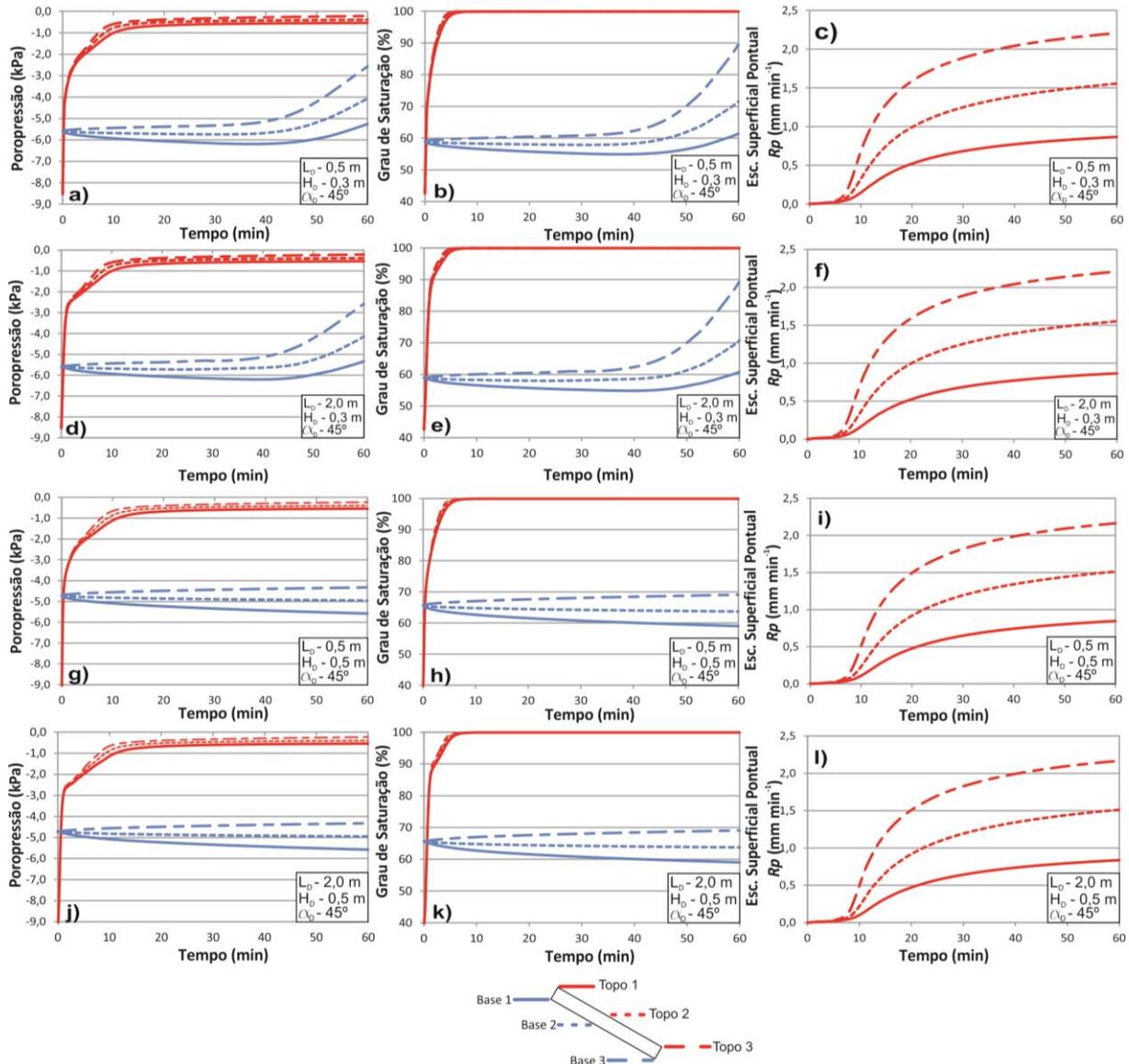


Figura 3.14. Estágio 3 - poropressões, grau de saturação e escoamento superficial pontual para $S_i = 50\%$, $\alpha_D = 45^\circ$ e $H_D = 0,3$ e $0,5$ m.

Figuras de 3.12 até 3.14 mostram que o escoamento pontual não é uniforme ao longo da superfície da amostra. A não uniformidade é mais pronunciada para maiores ângulos de inclinação. No entanto, o valor de escoamento superficial do ponto central é aproximadamente igual ao valor médio obtido a partir dos dois pontos das bordas superiores. Como resultado, o escoamento superficial total obtido pela coleta do escoamento pontual produzido em toda a superfície é representativo das condições médias da amostra.

Na Figura 3.15 são apresentados os valores do coeficiente de escoamento superficial total, C_T (Equação 3.12), para múltiplas amostras e condições do SC. A primeira observação óbvia é que o coeficiente de escoamento total não é um valor único, mas um parâmetro dinâmico que evolui durante um dado evento de precipitação. Para $H_D = 0,15$ m, os valores de C_T aumentam rapidamente após cerca de 25 min de chuva, devido à influência das condições de limite inferior do SC. Para $H_D \geq 0,30$ m, essas condições de contorno tornaram-se menos importantes porque, para o mesmo valor de α_D , os valores de C_T são praticamente os mesmos.

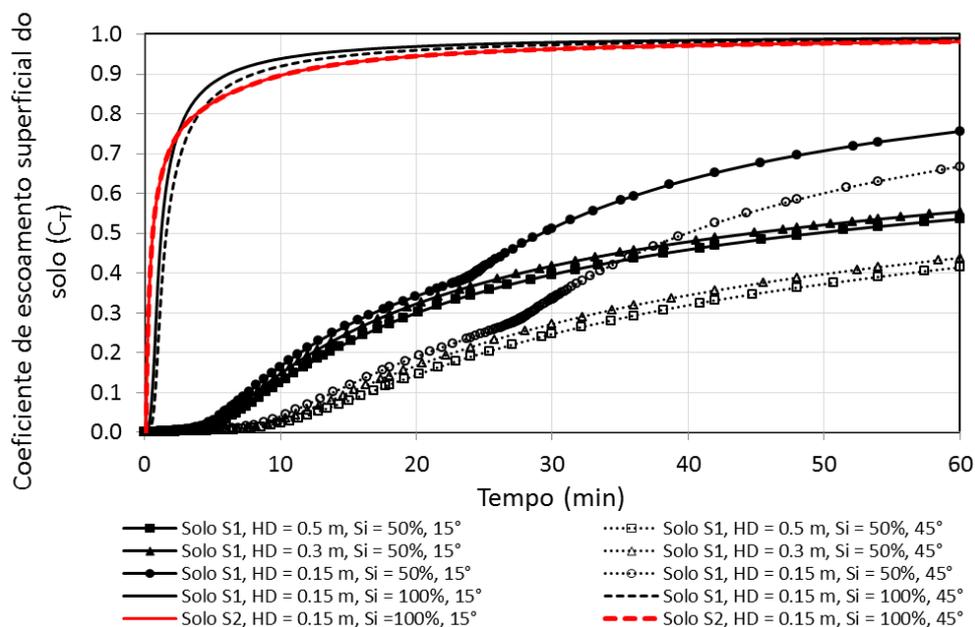


Figura 3.15. Estágio 3 - coeficiente de escoamento superficial para $L_D = 1,0$ m, diferentes espessuras e inclinações das amostras

A forma da curva C_T parece ser um bom indicador da qualidade das especificações de teste. As curvas que apresentam duas fases, como aquelas obtidas para o $H_D = 0,15$ m e $S_i = 100\%$, indicam que os efeitos do limite inferior influenciaram as medidas de escoamento superficial. As curvas restantes apresentadas na Figura 3.15 possuem formas que correspondem a condições de teste adequadas.

Os valores de C_T dependem do ângulo de inclinação da amostra. Ângulos de inclinação mais baixos produzem coeficientes de escoamento mais altos. Essa observação pode parecer contraintuitiva no começo. No entanto, esse comportamento é uma consequência lógica da maior fração dos valores totais de precipitação que atingem a superfície do solo quando α_D é menor. Quanto mais a precipitação atinge a superfície da amostra, mais rápido o aumento do grau de saturação se pronuncia, produzindo valores mais altos de escoamento superficial.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi demonstrado que as condições iniciais de uma amostra em SC requerem um exame cuidadoso. O equilíbrio hidráulico antes do teste depende das propriedades do material, do grau inicial de saturação e das dimensões da amostra. Atenção também deve ser dada à possibilidade de que a redistribuição de umidade devido à inclinação da amostra possa se sobrepor aos processos de fluxo de água durante o teste de escoamento, alterando o escoamento superficial medido. Os tempos de equilíbrio requeridos e o possível efeito de inclinação foram avaliados para várias condições experimentais.

As curvas de escoamento são compostas de duas fases principais, com a primeira correspondendo à ausência de escoamento superficial e a segunda apresentando valores crescentes de C_T . A duração da primeira fase pode ser encurtada pela adoção de taxas de precipitação mais altas. Uma terceira fase de escoamento pode ocorrer para amostras com espessuras relativamente pequenas, devido ao fundo impermeável do SC. Esse efeito de fronteira indesejável impõe uma limitação importante à capacidade do aparelho em representar condições de campo.

Embora as condições do fundo de drenagem livre não tenham sido analisadas, elas também são consideradas potencialmente não representativas das condições de campo. Uma analogia que pode ser usada para descrever uma base de drenagem livre é a de uma barreira capilar. A base de drenagem livre imporá uma condição similar a um material extremamente grosso colocado abaixo do material mais fino, impedindo o fluxo até que a barreira capilar se rompa.

Os resultados de escoamento superficial simulado mostraram ser insensíveis ao comprimento da amostra, pelo menos para as faixas consideradas aqui. Como consequência, é recomendado que o comprimento da amostra em um SC seja especificado como uma função das capacidades e limitações do componente de simulação de chuva do sistema. Áreas de superfície menores são preferíveis para produzir chuvas artificiais uniformes.

O coeficiente de escoamento superficial depende da inclinação da superfície. Encostas planas produzem maior escoamento devido ao aumento da precipitação efetiva aplicada à projeção horizontal da superfície do solo. Descobriu-se também que inclinações mais suaves produzem distribuições de escoamento superficial pontual mais uniformes, o que é desejável em termos de interpretação de dados de teste. No entanto, as distribuições de escoamento superficial pontual desuniformes obtidas quando a amostra é testada usando inclinações mais altas ainda

pode ser avaliada de uma maneira não tendenciosa, usando o escoamento superficial total, uma vez que ele corresponde ao valor médio de um escoamento pontual linearmente distribuído.

Os resultados obtidos indicam que $L_D = 0,50$ m e $H_D = 0,30$ m são especificações de teste adequadas para os solos estudados e duração de teste de 60 min. No entanto, a disponibilidade de um SC que permita o uso de amostras com espessuras variadas é desejável para acomodar outros tipos de solo e requisitos de teste. Simulações numéricas anteriores devem sempre ser realizadas quando as propriedades hidráulicas do solo estiverem disponíveis, a fim de especificar a duração ideal do teste e a espessura da amostra. Adicionalmente, curvas de escoamento superficiais experimentais devem ser interpretadas seguindo as regras gerais aqui apresentadas e as especificações de teste atualizadas quando os efeitos de contorno forem observados.

4. MODELAGEM FÍSICA (SIMULADOR DE CHUVA)

Muito se fala no desenvolvimento de novas tecnologias e equipamentos laboratoriais e de campo para avaliação geotécnica, sejam eles para avaliação de resistência, umidade, permeabilidade e deformabilidade. Porém, o processo de idealização, planejamento, elaboração técnica, instrumentação e construção do modelo físico muitas vezes esbarra em dificuldades econômicas e de projeto (fator escala). Diante disso, este capítulo descreve a experiência de confecção de um simulador de chuva portátil (SC) para avaliação da infiltração e do coeficiente de escoamento superficial de amostras não saturadas com e sem cobertura vegetativa sob diferentes cenários de inclinação, espessura e comprimento de amostras. Destaca-se que o desenvolvimento e a construção deste tipo de equipamento também permite simular fenômenos geotécnicos e hidrológicos, como: compactação do solo devido à ação de diferentes tamanhos de gotas de chuvas, desenvolvimento de erosões, carreamento e transporte de sedimentos e contaminantes, deslizamentos de taludes e drenagem de pavimentos. O SC desenvolvido controla os requisitos de intensidade, tamanho e uniformidade da distribuição das gotas de chuvas simuladas (hidrológicos) e monitora o conteúdo volumétrico de água e sucções (geotécnicos), além de aspectos geométricos (comprimento, inclinação e espessura) das amostras ensaiadas.

4.1 INTRODUÇÃO

Pesquisas em campo utilizando chuvas naturais é um grande desafio para os pesquisadores, haja vista que não se têm controle sobre as variáveis que compõem as chuvas (Sphor *et al.*, 2015; Sousa Júnior *et al.*, 2017). Dessa forma, busca-se em laboratórios e em campo utilizar-se dos SC para a produção de eventos pluviométricos controlados, capaz de gerar diferentes intensidades, uniformidade, diâmetros de gotas, velocidades terminais e energia, além de avaliar como o solo se comporta frente as variações de inclinação, umidade e sucções.

Assim, os SC são importantes equipamentos desenvolvidos e utilizados para avaliação hídrica e geotécnica do solo quando exposto à chuva. A utilização de SC permite simular alguns fenômenos como: compactação do solo devido à ação de diferentes tamanhos de gotas de chuvas, desenvolvimento de erosões, carreamento e transporte de sedimentos e contaminantes, deslizamento de taludes e drenagem de pavimentos, avaliando o escoamento superficial e a infiltração da água sobre o solo exposto ou com cobertura vegetal. A construção e o

desenvolvimento de um SC expandem os estudos hidrológicos e geotécnicos, possibilitando a constituição de uma ampla bibliografia independente da região e da época do ano.

Vários estudos relatam o desenvolvimento, a calibração e a utilização de SC para os mais diversos fins, como: pesquisas agrárias (Montebeller *et al.*, 2001; Alves Sobrinho *et al.*, 2008; Abudi *et al.*, 2012), estudos de infiltração (Shao & Baumgartl, 2014; Rahardjo *et al.*, 2012), hidrologia urbana, em especial, pavimentos permeáveis (Araújo *et al.*, 2000; Silva, 2006; castro, 2011), processos de acumulação e carreamento de poluentes em pavimentos e telhados (Egodowatta, 2007; Egodowatta *et al.*, 2007, 2009; Miguntanna, 2009; Hengren, 2005) e pesquisas sobre qualidade da água de escoamento pluvial.

SC também são utilizados em pesquisas geotécnicas para avaliação de perda de solo e erosões (Skz, 2011; Zhang *et al.*, 2014; Sadeghi *et al.*, 2015), deslizamentos de solo e estabilidade de taludes (Egeli & Pulat, 2011; Cecconi *et al.*, 2014; Montrasio *et al.*, 2015) e infiltração e percolação em solos não saturados (Römken, 2001; Miyazaki, 2005; Montoya-Dominguez, 2017). Faz-s necessário, nesses casos, avaliar a interação solo-atmosfera a partir da análise de fluxo de água em solos não saturados.

Porém, para que os SC sejam utilizados em qualquer tipo de pesquisa citada anteriormente, é necessária sua calibração no que se refere às condições iniciais, aos efeitos de fronteira, características das chuvas simuladas e ao efeito escala (avaliação da geometria e dimensões amostradas). Sobre as características das chuvas simuladas já existem inúmeros estudos, discussões e resultados sobre os limites e tolerâncias admitidas sobre a uniformidade, diâmetros das gotas, velocidade e energia cinética desta chuvas (Sphor *et al.*, 2015; Sousa Júnior *et al.*, 2017). Com relação a otimização da geometria, delimitação das condições ideais de uso e modelagem numérica da interação solo-atmosfera ou solo-atmosfera-vegetação, a literatura ainda carece de maiores detalhes e quanto aos componentes e partes constituintes dos SC, aí as informações são muito simplificadas ou quase inexistem.

Diante disso, o objetivo deste capítulo é descrever como foi idealizado, desenvolvido, construído e calibrado o SC portátil capaz de ensaiar amostras de solo não saturadas com e sem vegetação, destacando suas partes constituintes, potencialidades e limitações seja tanto para estudos hidrológicos, quanto para geotécnicos.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Idealização do simulador de chuva (SC)

O aparato experimental (SC) proposto foi idealizado a partir da necessidade interdisciplinar exigida na compreensão dos fenômenos que envolvem a interação solo-atmosfera (ISA). Assim, pensou-se em projetar um SC que representasse situações hidrológicas e geotécnicas as mais reais possíveis em amostras de solo em diferentes condições geométricas, inclinações e umidades iniciais representativas de campo (Figura 4.1).

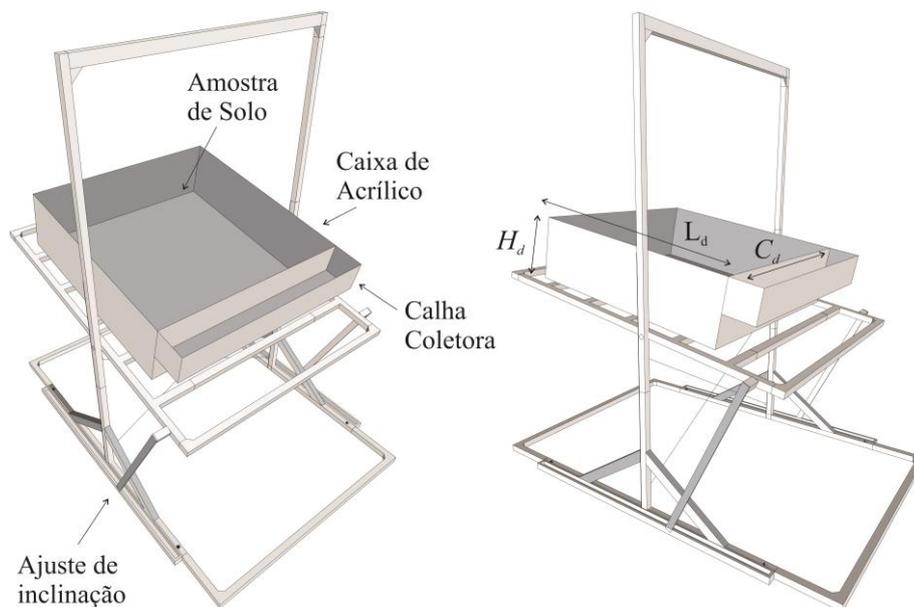


Figura 4.1. Idealização inicial do aparato experimental do SC

Percebe-se que os estudos envolvendo a ISA quase sempre recorrem ao uso de SC ou dados obtidos em estações pluviométricas compactas dotadas de sensores apropriados (instaladas preferencialmente próximas ao local de estudo). Nesse contexto as avaliações se restringem somente ao detalhamento profundo de um dos elementos envolvidos (precipitação e escoamento para estudos hidrológicos, vegetação para estudos agrônômicos de proteção e carreamento de solo, solo quando se trata de comportamento geotécnico), quase nunca destacando todo o conjunto.

Dentro dessa perspectiva, o projeto de construção do SC contou com o planejamento e o desenvolvimento de três componentes ou módulos principais, sendo: a) estrutural ou aparato, compreendendo os projetos metálicos, mecânicos e hidráulicos; b) geração de chuva, abrangendo automatização do acionamento, controle (pressão) e tempo da geração da chuva e

c) monitoramento, relativo ao acompanhamento e ao armazenamento das variações de umidade e sucções do solo ensaiado.

A elaboração do projeto técnico do SC levou também em consideração a escolha adequada dos materiais envolvidos e o apropriado dimensionamento dos projetos e sistemas utilizados, peso estrutural, praticidade e facilidade de montagem e transporte, operação e aquisição de dados.

4.2.2 Construções dos componentes do simulador de chuvas

O SC é composto por três módulos: aparato, geração de chuva e monitoramento. O módulo aparato corresponde à estrutura física do SC, responsável por receber e suportar toda a carga proveniente das amostras a serem ensaiadas. O módulo geração de chuva se refere à parte automatizada de controle e acionamento hidráulico do SC e o módulo monitoramento é responsável por monitorar e armazenar as variações de teor de umidade e sucções do solo frente ao ensaio de chuva e ao longo do tempo.

4.2.2.1 Módulo aparato

O módulo aparato ou estrutural do SC é a parte responsável por receber, sustentar e impor diferentes inclinações (0 a 50°) às cargas atuantes das amostras que serão ensaiadas, viabilizando situação parecida com as condições topográficas de campo, com o propósito de analisar as variações de sucção, umidade, infiltração e escoamento superficial.

O aparato é composto por estrutura metálica e um recipiente acrílico, com dimensões estabelecidas pelas simulações numéricas sobre efeito escala desenvolvidas e propostas por Mendes *et al.* (2020). Todo o projeto estrutural metálico idealizado foi desenvolvido com o auxílio do *software* STRAP, versão 2009, para verificação dos parâmetros de: resistência à tração, compressão, momento fletor e torção, cortante, flexão e flambagem, considerando as cargas atuantes, sobrecarga e perfis metálicos comerciais padrão (ABNT, 2008; 2019). Na Tabela 4.1 são apresentados os parâmetros de projeto considerados no dimensionamento da estrutura metálica do SC.

Tabela 4.1. Parâmetros considerados para o projeto estrutural metálico (aparato)

Parte do SC	Descrição	Características	Simbologia	Valor
Aparato metálico	Aço-carbono ASTM-36	Tensão nominal máxima ao escoamento do aço (MPa)	f_y	250,0
		Tensão de cálculo ao escoamento do aço (MPa)	f_{yd}	$400 A_s^*$
		Tensão de ruptura nominal do aço (MPa)	f_u	400,0
		Módulo de elasticidade (GPa)	$E_{aço}$	200,0
		Coefficiente de Poisson	ν	0,26
Soldas	Eletrodos E-70XX AWS	Tensão de ruptura do metal da solda (MPa)	f_w	485,0

* A_s é a área da seção transversal da peça em questão [L^2].

O recipiente acrílico (formato de caixa) é o componente responsável por acondicionar e representar as condições de fronteira e escala do material a ser ensaiado, além de possibilitar o acompanhamento visual de todos os ensaios. O recipiente acrílico também possui alguns acessórios, como: calha coletora do escoamento superficial, saídas e estruturas auxiliares para instalação dos sensores de umidade e tensiômetros.

4.2.2.2 Módulo geração da chuva

O módulo geração da chuva é composto por uma parte eletroeletrônica, automatizada, responsável por controlar a velocidade da bomba centrífuga, a pressão da rede hidráulica e o tempo de geração das diferentes precipitações artificiais; e outra hidráulica, a qual contém reservatório, tubos de PVC soldável, conexões, sensor de pressão, bico aspersor e bomba centrífuga, ou seja, a rede física do sistema.

A parte eletroeletrônica desenvolvida conta com sistema de ajuste de velocidade do tipo PID (proporcional, integral e derivativo), programado em processador Arduíno Mega e acionamento/controle por *bluetooth*, que controla automaticamente as pressões de serviço na rede hidráulica (0 a 100 kPa), além de possibilitar a programação do tempo total, de abertura e fechamento da válvula solenóide que alimenta o fluxo de água para o bico aspersor para a geração das chuvas. Tanto a duração quanto a pressão da rede para gerar as chuvas artificiais podem ser ajustadas de forma constante, variável ou em pulsos, sendo que para este trabalho foram realizadas chuvas constantes e pulsantes. Morin *et al.* (1967) recomendam que a

aplicação da chuva simulada seja de modo contínuo na área experimental utilizada ou, no mínimo, promova duas aplicações por segundo, garantindo intermitência e Smith (1976) sugere que essas chuvas simuladas aconteçam em áreas experimentais mínimas de 0,5 m², o que não foi atendido totalmente neste estudo, pois, as parcelas experimentais foram de 1 m² e predominantemente de 0,25 m².

Os componentes principais da parte eletroeletrônica são: sensor de pressão, válvula solenóide, inversor de frequência e controlador PDI, além de utilização de aplicativo disponibilizado para *smartphone Android Bluetooth*.

A parte hidráulica conta com reservatório (200 l), bomba d'água centrífuga monoestágio trifásica (potência de 0,5 kW), capaz de gerar pressões adequadas de serviço (0 a 100 kPa), tubos e conexões comerciais padrões de PVC soldável (joelho, tês, válvula de retenção, luvas etc), manômetro seco (também de 0 a 100 kPa) e bico aspersor. Todo o projeto hidráulico seguiu recomendações técnicas das normas ASME, principalmente quanto à distância adequada de instalação das conexões, ou seja, mais de 40 diâmetros livres à montante e 10 diâmetros livres à jusante de qualquer singularidade da tubulação para diminuição dos efeitos indesejáveis no escoamento. Apesar do ajuste de pressão ser automático, justifica-se a utilização de manômetro instalado no mesmo ponto que o sensor de pressão para validação das pressões de serviço na rede hidráulica.

Importante componente hidráulico a ser adotado no SC é o bico aspersor, responsável pelo tipo de jato (chuva artificial) a ser aplicado nas amostras de solo em função da altura e da pressão de serviço. A adequada escolha do aspersor (marca, tipo e características técnicas) seguiram recomendações de Sousa Júnior *et al.* (2017) e informações técnicas dos próprios fabricantes dos aspersores (Spraying Systems Co®, 2008) no que se refere ao tamanho da gota produzida em ensaios laboratoriais (Figura 4.2). Destaca-se aqui que, de acordo com Miguntanna (2009), o diâmetro médio das chuvas naturais são de 2,0 a 2,5 mm aproximadamente, sendo esse critério adotado para escolha do aspersor a ser utilizado no SC.

Salienta-se que Sousa Júnior *et al.* (2017) utilizaram aspersores do mesmo fabricante, porém, de jato do tipo cone cheio (aspersor *fulljet* ½"-SS-HH-40) enquanto neste estudo foi adotado aspersor de cone quadrado cheio, simbolizado por SQ, por utilizar parcelas experimentais menores e com formato quadrado. Na Figura 4.2 não são apresentados os modelos de aspersores quadrado (SQ). Todavia, como são também do tipo *fulljet*, pode-se recorrer à última linha da

Figura 4.2 para perceber que gotas acima de 1,0 mm podem ser produzidas por esses tipos de aspersores.

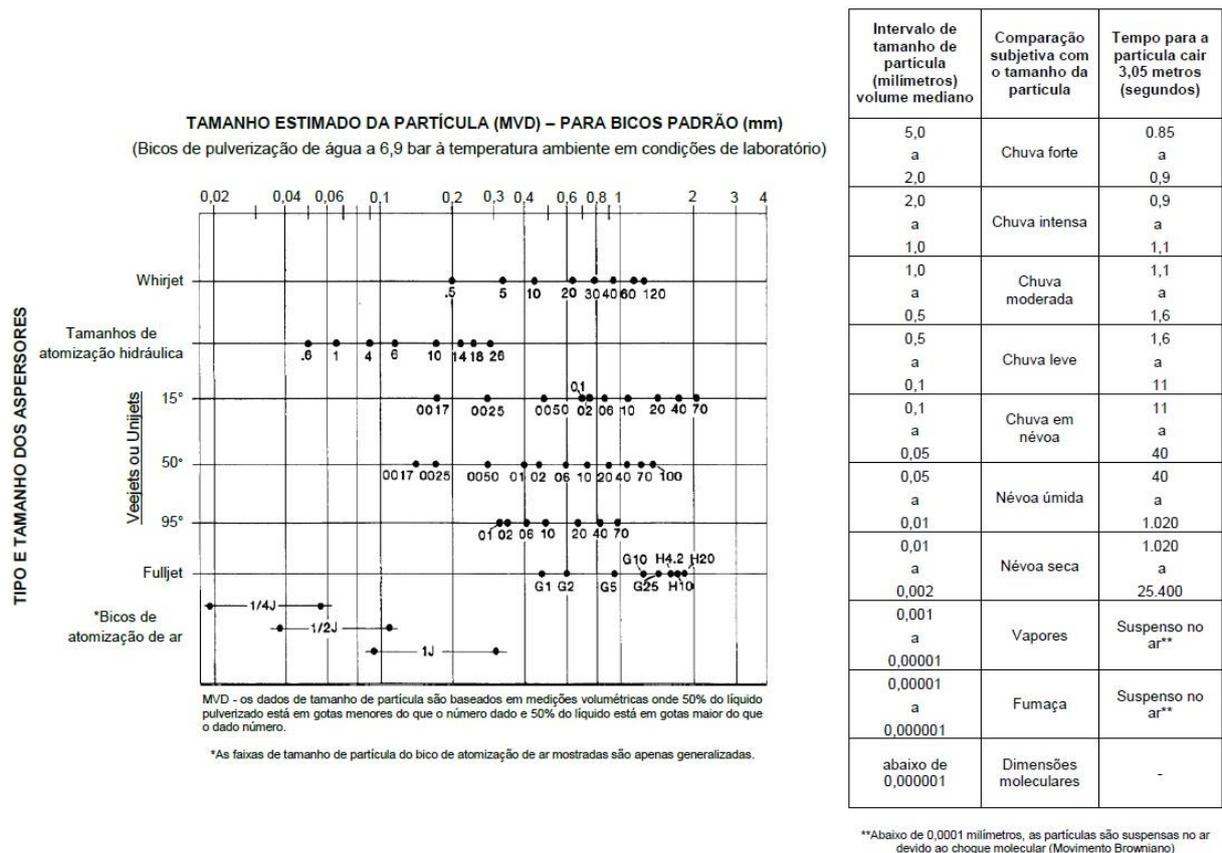


Figura 4.2. Especificações técnicas dos aspersores. Fonte: adaptado de Spraying Systems Co® (2008).

Assim, foram avaliados dois aspersores com jato de cone quadrado, o ¼”-10SQ-HHSQ e o ½”-29SQ-HHSQ, no que diz respeito a uniformidade, distribuição do tamanho das gotas e intensidade da chuva gerada pelos mesmos. A Tabela 4.2 apresenta as características dos aspersores e seu desempenho conforme catálogo do fabricante, onde os aspersores utilizados estão destacados na cor vermelha.

Tabela 4.2. Idealização inicial do aparato experimental do SC.

*Pressão expressa em bar.

Conexão de Entrada (pol.)	Tipo do Bico				Capacidade	Diâmetro do Orifício (mm)	Diâmetro Máximo de Passagem Livre (mm)	Vazão (litros por minuto)*										Ângulo de Pulverização (°)*		
	G-SQ	GG-SQ	HH-SQ	H-SQ				0,4	0,5	0,7	1,5	2	3	4	6	7	10	0,5	1,5	6
1/8	●	●	●		3.6SQ	1.6	1.3	1.1	1.2	1.4	1.9	2.2	2.7	3.1	3.7	4.0	4.7	40	52	47
	●	●	●		4.8SQ	1.9	1.3	1.4	1.6	1.8	2.6	3.0	3.6	4.1	4.9	5.3	6.2	48	63	57
	●	●	●		6SQ	2.4	1.3	1.8	2.0	2.3	3.2	3.7	4.5	5.1	6.1	6.6	7.8	60	66	60
1/4	●	●	●		10SQ	2.8	1.6	2.9	3.3	3.8	5.4	6.2	7.4	8.5	10.2	11.0	13.0	62	67	61
	●	●	●		12SQ	3.2	1.6	3.5	3.9	4.6	6.5	7.4	8.9	10.2	12.3	13.2	15.5	70	75	68
			●		14.5SQ	3.9	1.6	4.3	4.7	5.5	7.8	9.0	10.8	12.3	14.8	15.9	18.8	78	82	75
3/8	●	●	●		18SQ	4.0	2.4	5.3	5.9	6.9	9.7	11.1	13.4	15.3	18.4	19.8	23	71	75	68
1/2	●	●	●		29SQ	5.6	3.2	8.5	9.5	11.1	15.7	17.9	22	25	30	32	38	71	75	68
			●		36SQ	6.4	3.2	10.6	11.8	13.7	19.5	22	27	31	37	40	47	78	82	75
3/4			●		50SQ	6.7	4.4	14.7	16.3	19.1	27	31	37	42	51	55	65	71	75	68

A avaliação da geração das chuvas simuladas deve atender aos principais critérios e requisitos sugeridos para essas, como a distribuição do tamanho das gotas de chuva (Brodie & Rosewell, 2007; van Dijk *et al.*, 2002; Eigel & Moore, 1983), velocidade terminal da gota (Li & Kawano, 1995; van Dijk *et al.*, 2002; Ribeiro *et al.*, 2006; Pérez-Latorre *et al.*, 2010), energia cinética (Beard & Pruppacher, 1969; van Dijk *et al.*, 2002) e uniformidade das gotas de chuva (Christiansen, 1942).

Assim, no que se refere à uniformidade da distribuição das chuvas simuladas, Meyer & Harmon (1978) e Tossel *et al.* (1987) sugerem valores iguais ou superiores a 80% enquanto Minguntanna (2009) sugere valores maiores que 70%. No que tange à energia cinética da chuva simulada, Meyer & Mccune (1958) sugere relação igual ou maior que 75% entre a energia cinética e a chuva natural, requisitos esses que foram atendidos e serão discutidos a seguir.

4.2.2.3 Módulo monitoramento

O módulo monitoramento do SC é responsável pelo armazenamento dos dados relativos aos parâmetros do solo antes, durante e após o ensaio de chuva. Esse módulo é constituído de três partes, cada parte possui *data logger* específico (Figura 4.3), sendo a primeira composta por cinco sensores de umidade volumétrica do tipo EC-5 para determinação do conteúdo de água volumétrica do solo e *data logger* do tipo Em-50; a segunda composta por cinco mini-tensiômetros do tipo coluna d'água T5-10 para determinação das poropressões no solo e consequentemente as sucções e *data logger* do tipo GP2 e, por fim, a terceira parte que contempla a aquisição de dados dos fluxos escoados e do solo erodido por balança de precisão, com *data logger* ajustado para trabalhar com microprocessador do tipo Arduíno. O local e o posicionamento de instalação dos sensores de umidade e tensiômetros podem ser visualizados com mais detalhes no esquema apresentado na Figura 4.5.

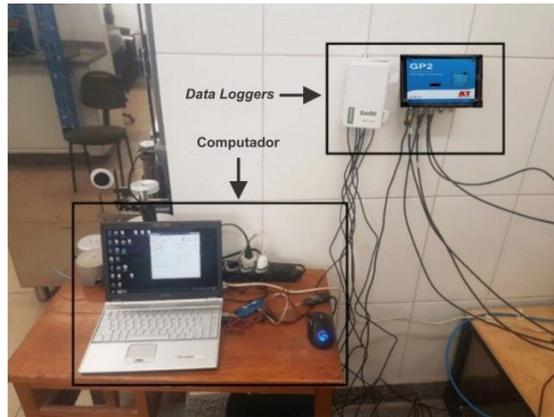


Figura 4.3. *Data loggers* utilizados para armazenamento dos dados de conteúdo volumétrico de água e sucções.

Os sensores de umidade volumétrica EC-5 funcionam com o princípio de constante dielétrica do meio a partir de tecnologia de capacitância e frequência. Esse tipo de sensor pertence à classe de sensores de domínio de frequência, pois operam com frequência fixa, aplicando frequência de 70 MHz e possibilitando uma redução aos efeitos de salinidade e textura, o que proporciona maior precisão dos dados. A Figura 4.4 ilustra o sensor e as suas dimensões, sendo o teor de água volumétrica medido em todo o comprimento da sonda, a capacidade de mensuração de 0 a 100% em solos saturados e de 40 a 60% para outros tipos de solos (Decagon Devices, 2008).

O tensiômetro T5 foi utilizado para medir a tensão da água no solo (Figura 4.4). Sua função é converter a tensão da água em um sinal elétrico contínuo, medido ou transmitido por uma fonte de alimentação que apresenta o sinal elétrico na unidade de pressão, nesse caso em hPa (hectopascal). O princípio do sensor baseia-se no efeito piezoresistivo dos semicondutores de silício, que mudam sua resistência elétrica específica na deformação e são processados para um sinal definido por meio de uma ponte de *Wheatstone*. A deformação é causada pela pressão (ou tensão da água) no *chip* de silício, que é muito fino e, portanto, extremamente sensível a variações de pressão. O transdutor de pressão é calibrado para 10,6 Vcc e, por essa razão, requer uma fonte de alimentação regulada, pois o sinal sofre alterações devido à mudança direta à fonte de alimentação, para 10,6 Vdc, obtendo sinais que vão de 0 hPa \approx 0 mVdc a 100 hPa \approx 10 mVdc (Pressure & Tensiometer, 2001).



Figura 4.4. Tensiômetro e sensor de umidade, respectivamente.

Para o monitoramento e a aquisição de dados dos fluxos escoados no tempo utilizou-se balança de precisão conectada a microprocessador programável em Arduino. Esse tipo de equipamento possibilita o envio da massa de água escoada superficialmente na amostra de solo em intervalos programáveis de tempo sendo, neste caso, a cada 5 min de chuva artificial aplicada.

Na Figura 4.5 são destacados como os três módulos estão dispostos no simulador de chuva, suas interconexões, componentes e fluxo.

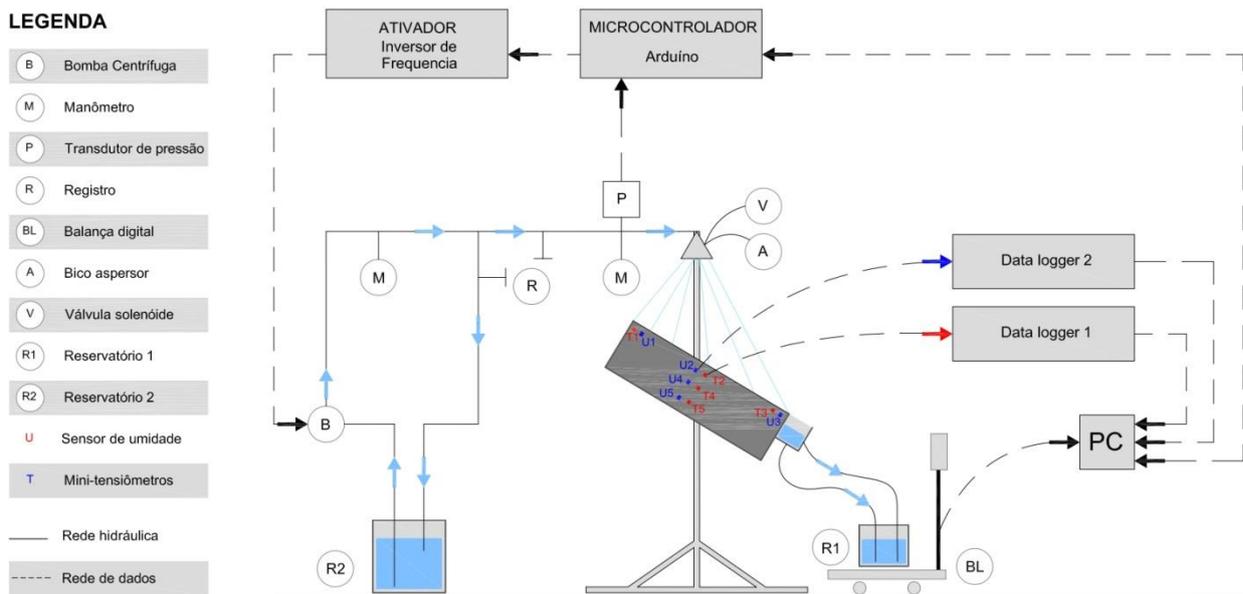


Figura 4.5. Esquema completo do SC com seus respectivos módulos de criação.

4.2.3 Calibração dos módulos do simulador de chuva

4.2.3.1 Calibração do módulo geração das chuvas

Para o bom funcionamento do SC, a chuva simulada deve ser a mais próxima possível de uma chuva real. Conhecendo o tamanho, a massa, o volume e a velocidade das gotas, grande parte das características da chuva, tais como intensidade, altura e energia cinética podem ser derivadas destas propriedades.

Assim, para calibração da intensidade real calculada, simulada e média, definidas neste estudo como sendo a intensidade que efetivamente é produzida pelo aspersor, a intensidade que efetivamente precipitou sob área de $1,0 \text{ m}^2$ e $0,25 \text{ m}^2$ e a intensidade que efetivamente foi captada pelos coletores utilizados na determinação do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), respectivamente, utilizou-se método volumétrico de medição de vazão.

O método volumétrico de medição de vazão contou com a utilização de balança de precisão (0,01 grama) para medir a massa de água precipitada em tempos pré-determinados (constantes ou pulsados) para cada pressão de serviço (50, 70 e 100 kPa). Assim, considerando a massa específica da água na devida temperatura local, obtém-se os volumes, e conseqüentemente, as vazões e intensidades.

A calibração do módulo geração da chuva segue com a avaliação da uniformidade da distribuição das gotas de chuva utilizando o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), já definido pela Equação 2.12, Capítulo 2.

Meyer & Harmon (1979), Tossel *et al.* (1987) e Silva (2006) consideram que valores de CUC acima de 80% são aceitáveis para uniformidade de distribuição das gotas de chuva em simuladores de chuvas, entretanto para Minguntanna (2009) um CUC acima de 70% é considerado suficiente, sendo o valor definido considerado para este trabalho.

Para a determinação da distribuição dos diâmetros das gotas de chuva foi utilizado o método da farinha, desenvolvido inicialmente por Bentley (1940), revisado por Hudson (1963, 1964) e que desde então vem sendo utilizado por Kincaid *et al.*, 1996; Hengren, 2005; Egodowatta, 2007; Minguntanna, 2009; Pérez-Latorre, 2010 e Sousa Júnior *et al.*, 2017. A partir da determinação dos diâmetros das gotas de chuva simuladas, foi possível determinar a velocidade terminal e energia cinética, como é mostrado na Figura 2.2, Capítulo 2.

A garantia das propriedades das chuvas simuladas só pode ocorrer caso a pressão de serviço seja mantida constante ao longo das simulações de chuva. Desta forma, utilizou-se manômetro e transdutor de pressão para comparação e validação das pressões de serviço na rede hidráulica. Tanto o manômetro utilizado quanto o transdutor de pressão foram calibrados conforme ABNT (2013) para utilização no SC proposto. O manômetro do tipo seco foi calibrado no laboratório de Furnas Centrais Elétricas S A e apresentou erro de exatidão de 1,1% (limite tolerado de 1,6%) e o transdutor de pressão foi calibrado no próprio SC, tomando como base as leituras medidas nos manômetros já calibrados (Anexo A). Na Figura 4.6 pode-se avaliar o resultado da calibração do transdutor de pressão e equação de ajuste implementada na programação do microcontrolador (Arduíno) para controle das pressões de serviço.

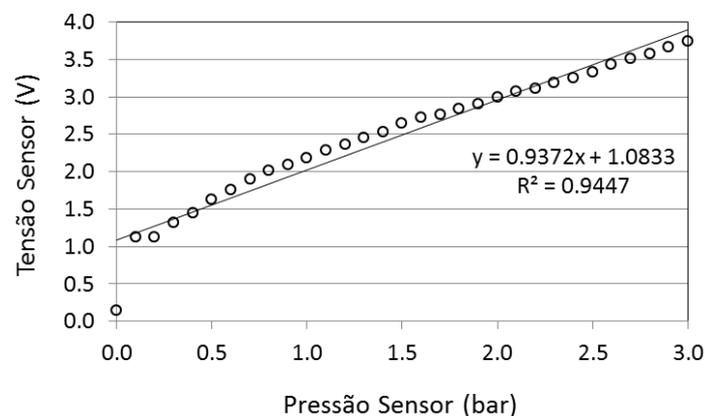


Figura 4.6. Equação de ajuste de calibração do transdutor de pressão para implementação no módulo geração de chuva em sistema PID.

4.2.3.2 Calibração do módulo monitoramento

4.2.3.2.1 Calibração dos sensores de umidade

Esse processo foi realizado separadamente para cada um dos sensores de umidade utilizados. No total, foram calibrados sete sensores de umidade, dos quais cinco foram utilizados nos ensaios e dois deixados de reserva para substituição, caso eventuais problemas surgissem ao longo dos ensaios. Inicialmente, a amostra de solo foi compactada em recipiente acrílico preparado para receber o sensor de umidade. Todas as amostras encontravam-se com umidade ótima de 18% e índice de vazios de 1,0 compatíveis com as futuras amostras a serem preparadas e ensaiadas no SC, sendo coletada a leitura inicial de cada sensor. Gradativamente, adicionou-se água ao solo contido no recipiente acrílico para o aumento do teor de umidade, sendo possível construir a curva de calibração para cada sensor (Anexo B). A cada incremento de adição de água nas amostras de solo, eram lidas as leituras dos sensores e coletadas amostras para

determinação da umidade gravimétrica (estufa) para comparação e aferição dos sensores de umidade. A Figura 4.7 ilustra as etapas do processo de calibração dos sensores umidade.



Figura 4.7. Etapas do processo de calibração dos sensores de umidade, Decagon EC-5.

A introdução do sensor na amostra de solo foi feita de maneira manual, porém, com auxílio de trado confeccionado pelo próprio autor da pesquisa, com dimensões pouco menores que as do sensor, para que posteriormente, a inserção garantisse contato com o solo, pois, não era possível compactar o solo com o aparelho já instalado. A compactação do solo com o sensor já instalado é possível, porém, buscando facilidade de instalação e a não destruição do equipamento devido às altas cargas de compactação, optou-se pela introdução/cravação.

As curvas de calibração dos sensores de umidade geralmente são expressas em termos de conteúdo volumétrico de água, θ_w , versus potencial elétrico, mV, onde o fabricante dos sensores utilizados (Decagon Devices, 2008) sugerem: $\theta_w = 0,00085mV - 0,4810$ [L^3L^{-3}], para qualquer solo (genérico). Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados finais de calibração dos sensores de umidade utilizados, destacando que o menor coeficiente de determinação encontrado foi do Sensor 3. Todos os resultados e curvas de calibração são apresentadas no Anexo B.

Tabela 4.3. Equações de ajuste da calibração dos sensores de umidade para solo avaliado ($e = 1,0$).

Sensor	z_s^* (cm)	Equação ($\theta_w \times mV$)	R^2	Equação ($w \times \theta_w$)	R^2
1	2,0	$\theta_w = 0,0009 mV - 0,4856$	0,9990	$w = 127,000\theta_w - 3,5690$	0,9886
2	2,0	$\theta_w = 0,0009 mV - 0,4882$	0,9998	$w = 122,710\theta_w - 4,3459$	0,9934
3	2,0	$\theta_w = 0,0009 mV - 0,5005$	0,9979	$w = 53,836\theta_w + 9,4149$	0,9498
4	15,0	$\theta_w = 0,0009 mV - 0,4851$	1,0	$w = 72,252\theta_w + 8,3262$	0,9942
5	28,0	$\theta_w = 0,0008 mV - 0,4793$	1,0	$w = 109,420\theta_w - 4,2080$	0,9963

* z_s : cota de instalação dos sensores de umidade na caixa acrílica (Figura 4.12).

Ressalta-se que os sensores de umidade medem o conteúdo volumétrico de água em um volume total pré-definido e não em um único ponto, sendo este volume de aproximadamente 0,3 l (Figura 4.8).

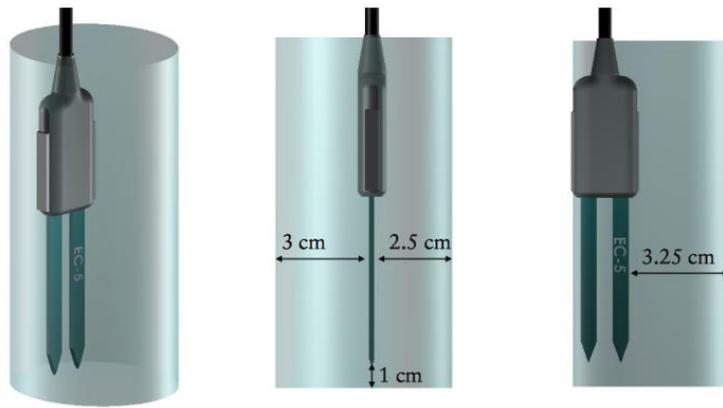


Figura 4.8. Volume de influência considerado na medição da umidade do solo pelo sensor EC-5 da Decagon Devices. Fonte: Decagon Devices (2008).

4.2.3.2.2 Saturação dos tensiômetros

Os tensiômetros utilizados são compostos por um corpo plástico (transdutor de pressão), haste acrílica e uma pedra porosa em sua ponta. Dentro da haste acrílica há presença de água destilada, sendo essa peça fundamental para a determinação das leituras de sucção, visto que o solo transmite a tensão para água, que é levada para o transdutor de pressão. Para o bom funcionamento do tensiômetro é necessário que não haja bolhas de ar no corpo e na haste acrílica, sendo necessária a realização da saturação dos tensiômetros. Para o processo de saturação foi inserida água destilada no corpo e haste do tensiômetro utilizando-se de bomba de sucção para remoção das bolhas presente na água inserida além de, saturar a pedra porosa (Figura 4.9). Para verificar se houve a correta saturação, utilizou-se *Infield* (equipamento portátil de leitura de tensões) para verificar o tempo de resposta das leituras, precisão e limites estabelecidos.

Destaca-se aqui que, tanto o tempo de resposta quanto os limites de leitura dos tensiômetros seguiram rigorosamente o que recomenda o manual do fabricante, sendo sete segundos para o tempo de resposta e -1.110 hPa de sucção máxima, respectivamente, sendo refeito todo o procedimento caso não fossem atingidos estas especificações. Diferentemente dos sensores de umidade, os tensiômetros medem as poropressões no solo e conseqüentemente a sucção do solo em um único ponto, ou seja, ponto onde a pedra porosa estiver em contato com o solo.



Figura 4.9. Etapas do processo de saturação dos tensiômetros (T5-10).

4.3 RESULTADOS - MODELO FÍSICO DESENVOLVIDO

4.3.1 Módulo aparato

Após todo o planejamento e o dimensionamento, o projeto estrutural do SC (módulo aparato) foi executado em aço A36 composto principalmente por perfis metálicos do tipo metalon 30x30 mm em chapa #14 (1,9 mm) e 35x35 mm em chapa #16 (1,5 mm), de encaixes e desmontáveis (presença de travas metálicas), duas cantoneiras de abas iguais de aço galvanizado de 4,45 cm (1.3/4") com 74,0 cm de comprimento em chapa #10 (3,35 mm), dois parafusos de 12,7 mm (1/2") com comprimento de 7,0 cm, duas porcas 1,91 mm (3/4") e dois tirantes de aço galvanizado 0,4 mm (5/32").

A estrutura metálica do SC é composta por dois montantes laterais de 120,0 cm apoiada sobre dois suportes verticais em formato A, com 130,0 cm de comprimento, trilho de inclinação e 75,0 cm de altura. Conectados aos suportes verticais em A, localizam-se dois suportes inferiores em U, com 125,5 cm de comprimento e 46,0 cm de largura. Sobre os montantes laterais verticais, são instaladas as cantoneiras de abas iguais que irão acomodar os suportes laterais da mesa de inclinação e os suportes superiores, formato U, com 120,0 cm de comprimento e 75,0 cm de altura. Para alocação da caixa acrílica, foi construída uma mesa de inclinação, localizada ao centro dos montantes laterais, gradeada. Essa mesa de inclinação é constituída de dois suportes em formato de U, com 115,0 cm de comprimento e 15,0 cm de largura, dois suportes laterais metálicos, com 130,0 cm de comprimento e 3,0 cm de largura e cinco barras de suporte dessa mesa, com 109,0 cm de comprimento. Também foram instaladas duas barras de auxílio para inclinar e travar o sistema de 83,0 cm de comprimento (Figura 4.10). Todo o equipamento é contraventado com cabos de aço galvanizado 0,4 mm (5/32").

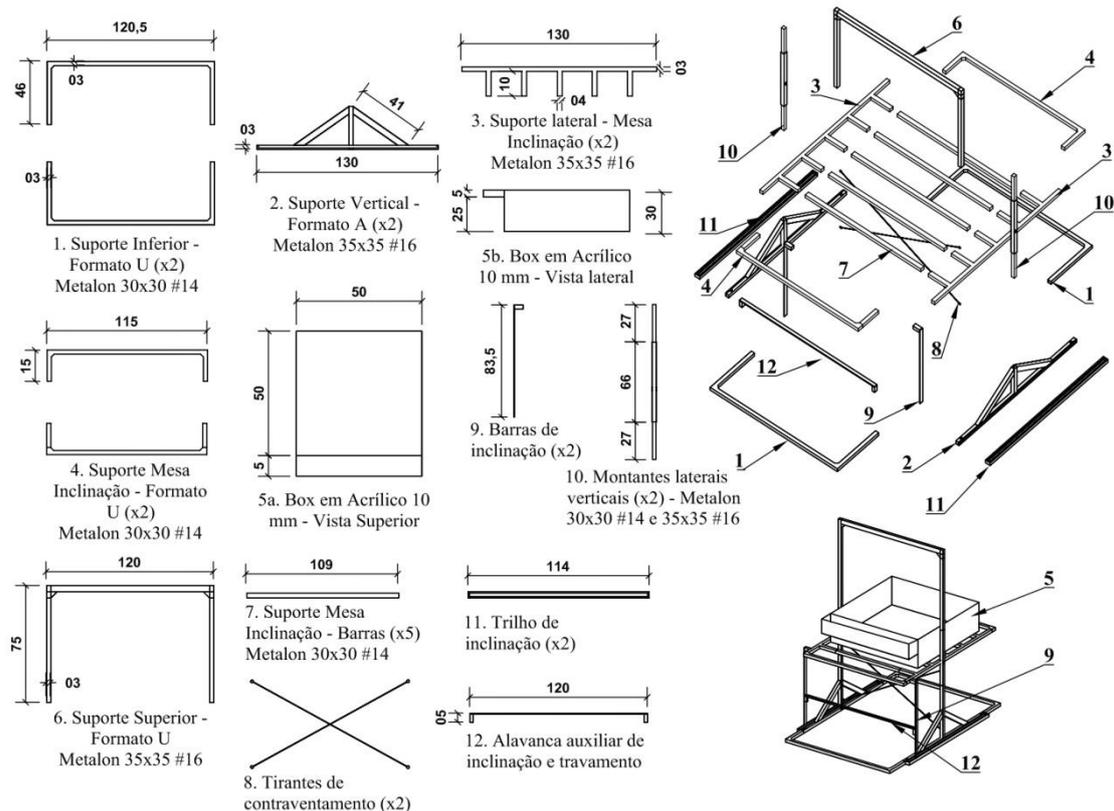


Figura 4.10. Módulo aparato: especificações e desenho técnico de todos os componentes metálicos desmontáveis do SC.

Inicialmente, produziu-se um recipiente acrílico transparente (caixa ou *box*) na espessura de 8,0 mm, dimensões de 1,0 x 1,0 x 0,15 m, sendo comprimento, largura e espessura, respectivamente. Posteriormente, após simulações numéricas envolvendo avaliação sobre fator escala (descrito no Capítulo 3), optou-se por caixa acrílica transparente de 10,0 mm de espessura na dimensão de 0,5 x 0,5 x 0,3 m. O recipiente acrílico conta com estrutura de captação do fluxo escoado (calha) também em acrílico transparente na espessura de 4 mm, possuindo dimensões de 0,05 x 0,05 x 0,5 m, com 50,0 cm de comprimento e 5,0 cm de largura e altura, além de estruturas auxiliares de conexões para os tensiômetros.

A calha coletora do escoamento superficial possui seis saídas, estrategicamente posicionadas (Figura 4.11), de forma a auxiliar e garantir o menor tempo de permanência do fluxo escoado na calha e evitar acúmulo de sedimentos que se confluem em um único ponto (conexão metálica do tipo cruzeta). A conexão metálica desenvolvida (cruzeta) é responsável por direcionar e conduzir os volumes escoados na superfície da parcela experimental para serem medidas pelos sensores de fluxo e balança de precisão (Figura 4.11). As recomendações da ASTM (2015) para a construção do SC foram consideradas.

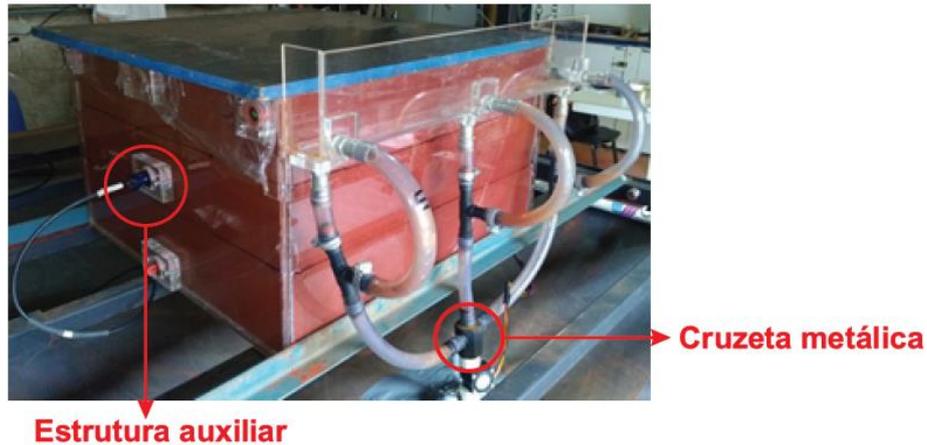


Figura 4.11. Detalhes e conexões auxiliares do recipiente acrílico com dimensões de 0,5 x 0,5 x 0,3 m.

Com relação aos locais de instalação dos tensiômetros e sensores de umidade do solo no recipiente acrílico, denominados de 1, 2, 3, 4 e 5 (Figura 4.12), eles foram cuidadosamente planejados para que atendessem aos requisitos de: a) entendimento de como ocorre a evolução da interceptação-infiltração-escoamento superficial na interface vegetação-solo-raízes; b) não sobreposição da área de influência de medição do conteúdo volumétrico de água de um sensor para os outros sensores, evitando que dois ou mais sensores meçam áreas iguais (círculos em azul na Figura 4.12); c) representatividade simétrica amostral e d) facilidade de instalação e não destruição parcial da amostra, principalmente para a parte mais superficial (aumento de volume devido a introdução/cravação dos sensores).

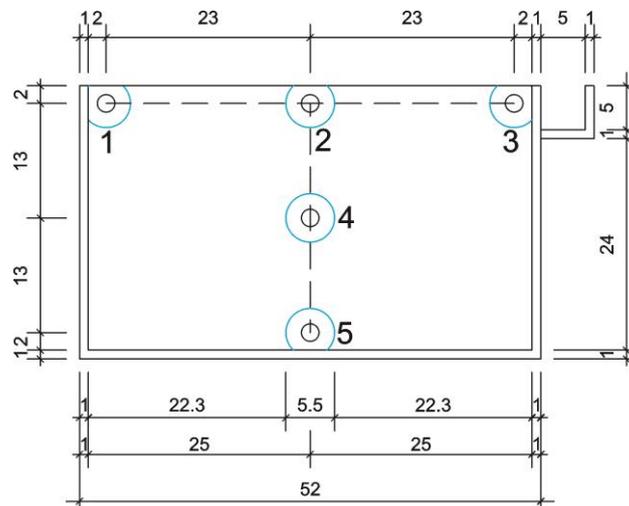


Figura 4.12. Vista lateral do recipiente acrílico (0,5 x 0,5 x 0,3 m) com indicação dos locais de instalação dos sensores de umidades e tensiômetros (sensores de 1 a 5).

O planejamento e a construção das estruturas auxiliares para conexões dos tensiômetros se justificam pelo fato de que a ligação corpo-haste do tensiômetro é muito sensível (rosca), ou seja, qualquer movimentação no cabo presente no corpo (transdutor de pressão) pode danificar a ligação, haja vista que a haste do sensor de umidade está totalmente confinada no solo. Dessa

forma, a estrutura auxiliar fixa muito bem o corpo do tensiômetro na caixa não possibilitando sua movimentação, mesmo que o cabo se mova (Figura 4.11).

Todo o planejamento, projeto, montagem e execução do aparato metálico e estruturas auxiliares foram realizados pelo próprio autor da pesquisa de forma manual, excetuando-se a confecção dos recipientes acrílicos, que foram confeccionados em indústria específica para esse tipo de material. Todas as partes dos recipientes em acrílico aqui utilizados são do tipo coladas, não havendo encaixes ou outra forma de conexão.

4.3.2 Módulos geração de chuva e monitoramento

O projeto do módulo geração de chuva contou inicialmente com a montagem e as simulações testes do sistema de controle de velocidade do tipo PID junto ao inversor de frequência, desenvolvido inicialmente em ambiente *protoboard*. Esse equipamento é capaz de regular e manter pressões programadas de serviços (30 a 200 kPa), mesmo considerando e readequando a pressão de serviço devido à perda de carga nas tubulações e acessórios após abertura e fechamento da válvula solenóide para geração das chuvas artificiais (Figura 4.13).

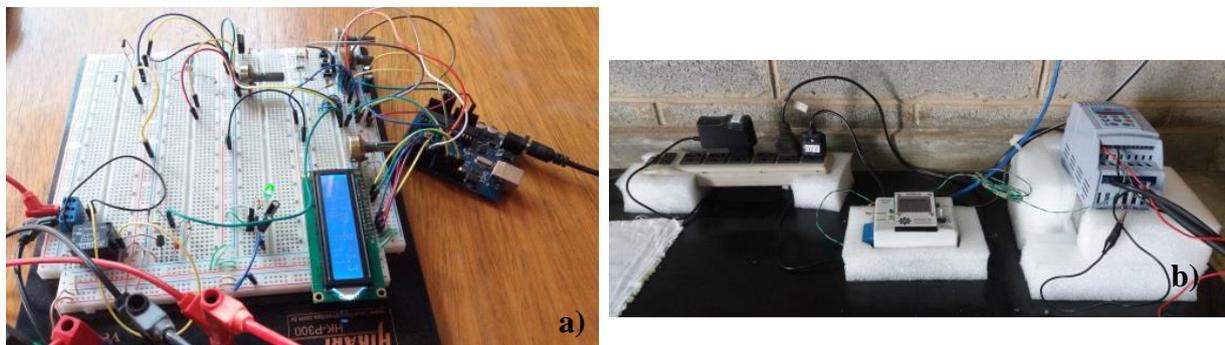


Figura 4.13. Sistema PID para controle automático da pressão de serviço: a) inicialmente em *protoboard*; b) finalizado em circuito impresso.

O controlador PID é o algoritmo de controle mais comum usado na indústria e tem sido universalmente aceito no controle industrial. A popularidade dos controladores PID pode ser atribuída em parte ao seu desempenho robusto em uma ampla gama de condições operacionais e em parte à sua simplicidade funcional, que permite aos usuários operá-los de maneira simples e direta. Como o nome sugere, o algoritmo PID consiste em três coeficientes básicos: proporcional, integral e derivado, que são variados para obtenção de uma resposta ótima.

A ideia básica por trás de um controlador PID é obter resposta de leitura de um sensor (neste caso pressão) e, em seguida, calcular a saída desejada do atuador calculando as respostas proporcionais, integrais e derivadas e somando esses três componentes para calcular a saída.

O componente proporcional depende apenas da diferença entre o *set point* e a variável de processo. Essa diferença é referida como o termo “erro”. O ganho proporcional (K_c) determina a relação entre a resposta de saída e o sinal de erro. Em geral, aumentar o ganho proporcional aumentará a velocidade da resposta do sistema de controle. No entanto, se o ganho proporcional for muito grande, a variável do processo começará a oscilar. Se K_c for aumentado ainda mais, as oscilações se tornarão maiores e o sistema se tornará instável e podendo oscilar de forma descontrolada (OGATA, 2011).

O componente integral (K_i) soma o termo de erro ao longo do tempo. O resultado é que mesmo um pequeno termo de erro fará com que o componente integral aumente lentamente. A resposta integral aumentará continuamente ao longo do tempo, a menos que o erro seja zero. Portanto, o efeito é direcionar o erro de estado estacionário para zero. Erro de estado estacionário é a diferença final entre a variável de processo e o ponto de ajuste. Um fenômeno chamado *windup* integral ocorre quando a ação integral satura um controlador sem que o controlador direcione o sinal de erro para zero (NISE, 2017).

O componente derivativo faz com que a saída diminua se a variável do processo estiver aumentando rapidamente. A resposta derivativa é proporcional à taxa de mudança da variável de processo. Aumentar o parâmetro tempo derivativo (K_d) fará com que o sistema de controle reaja mais fortemente às mudanças no termo de erro e aumentará a velocidade da resposta geral do sistema de controle. A maioria dos sistemas de controle prático usa tempo derivativo (K_d) muito pequeno, porque a resposta derivativa é altamente sensível ao ruído no sinal variável do processo. Se o sinal de *feedback* do sensor for ruidoso ou se a taxa de *loop* de controle for muito lenta, a resposta derivada pode tornar o sistema de controle instável também.

Assim, o processo com intuito de definir os ganhos ótimos de K_c , K_i e K_d para obter uma resposta ideal do sistema de controle (PID) é chamado de sintonização. Os ganhos de um controlador PID podem ser obtidos pelo método de tentativa e erro ou método Ziegler-Nichols, que é muito semelhante ao método de tentativa e erro em que K_i e K_d são definidos como zero e K_c é aumentado até o ciclo começar a oscilar. Uma vez iniciada a oscilação, o ganho crítico K_c e o período de oscilações são avaliados para finalizar o processo de sintonização (OGATA, 2011; NISE, 2017).

Sendo assim, foram realizadas inúmeras baterias de testes, por um período de aproximadamente um mês e meio para o ajuste refinado na determinação dos parâmetros necessários para o projeto do PID, além de aferição dos tempos de abertura, fechamento e total da válvula solenóide que controla o fluxo de água para o bico aspersor. Após isso, foi possível desenvolver todo o projeto eletroeletrônico a partir da confecção do circuito impresso e seus componentes (resistores, capacitores, transistores, diodos, regulador de tensão 12V-1,5A, CI LM 324, *trimpot*, *jumpers*, relés, *leds*, *reed switch*, e também módulos específicos para Arduino como: módulo *real time clock* - RTC, *bluetooth* e *encoder* rotativo), agora comandado via *bluetooth* (Figura 4.14) e não de forma manual, como no início do desenvolvimento do SC (Figura 4.13).



Figura 4.14. Tela principal do aplicativo de controle do sistema PID com comunicação via *bluetooth* para controle automático da pressão de serviço na rede hidráulica do SC desenvolvido.

Já o módulo monitoramento conta com dois *data loggers* já desenvolvidos em escala comercial, sendo um para obtenção e armazenamento dos dados de propressão do solo (cinco minitensiômetros instalados na lateral direita do recipiente acrílico) e outro para medição do conteúdo volumétrico de água no solo (5 sensores de umidade instalados na lateral esquerda do recipiente acrílico). Além dos *data loggers* comerciais utilizados, desenvolveu-se outro *data logger* em Arduino para o monitoramento da vazão escoada superficialmente pela amostra de solo ensaiada (Figura 4.15).

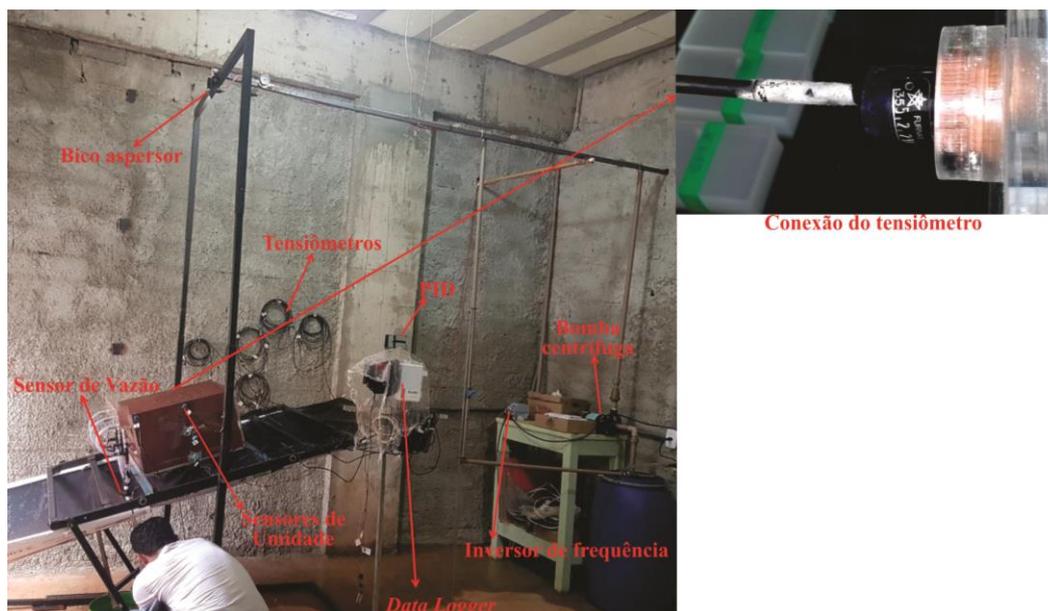


Figura 4.15. Projeto completo do SC com destaque para o módulo geração de chuva e monitoramento (ensaio realizado com 15° de inclinação para amostra com solo exposto).

Ressalta-se aqui que, o *data logger* que monitora, registra e armazena as poropressões no solo pode ser programado para intervalos de tempo de segundo a segundo, enquanto que o de conteúdo volumétrico de água pode ser programado apenas de minuto a minuto. Todas as características técnicas da instrumentação e dos sensores utilizados no simulador de chuva estão no Anexo C.

4.3.3 Avaliação das características das chuvas simuladas (artificiais)

Todas as características das gotas de chuva simuladas são proporcionadas pelo aspersor utilizado e são função da pressão de serviço e altura de aplicação da chuva, neste caso 1,89 m de altura, com exceção da determinação da velocidade terminal e energia cinética da gota de chuva em que foi considerada a altura de aplicação de 1,59 m, ou seja, 30 cm a menos devido à espessura da amostra. O procedimento para seleção do aspersor utilizado no SC se deu por meio de ampla pesquisa bibliográfica sobre os tipos de aspersores utilizados em SC, avaliação do tipo e forma de aspersão do jato de água (ex: cone oco, cone cheio, quadrado), facilidade de aquisição e manutenção, pressão de serviço exigida e disponibilidade de dados técnicos, conforme já apresentado no Item 4.2.2.2.

Inicialmente, realizou-se verificação da vazão de catálogo (fabricante) de saída dos bicos aspersores avaliados com a vazão real produzida no SC em função da pressão de serviço, ou seja, aferição das vazões simuladas com as do fabricante. A finalidade dessa etapa é conhecer a quantidade, seja em volume, vazão ou altura, da precipitação simulada que sai do bico

aspersos por unidade de tempo e que atinge a parcela experimental para diferentes inclinações no intuito de avaliar o balanço hídrico (Tabela 4.4).

Tabela 4.4. Aferição da vazão de saída dos bicos aspersores em função da pressão de serviço (Q_{SA}).

Aspersor	Pressão serviço (kPa)	Massa H ₂ O coletada em 1 min (g)	Volume (mL)	Vazão saída aspersor (L min ⁻¹)	Vazão saída aspersor - média (L min ⁻¹)	Vazão saída aspersor - catálogo (L min ⁻¹)	C_d^*	ξ_r (%)
<i>Fulljet</i> Quadrado 1/4"	100	4340	4347.8261	4.3478	4.3478	4.5	0.97	3.38
		4340	4347.8261	4.3478				
		4340	4347.8261	4.3478				
	70	3670	3676.6179	3.6766	3.6566	3.8	0.96	3.77
		3650	3656.5818	3.6566				
		3630	3636.5458	3.6365				
	50	3140	3145.6622	3.1457	3.1557	3.3	0.96	4.37
		3150	3155.6802	3.1557				
		3160	3165.6983	3.1657				
<i>Fulljet</i> Quadrado 1/2"	100	11980	12001.603	12.0016	12.0931	13.8	0.88	12.37
		12114	12135.845	12.1358				
		12120	12141.855	12.1419				
	70	9754	9771.5889	9.7716	9.8003	11.1	0.88	11.71
		9760	9777.5997	9.7776				
		9834	9851.7331	9.8517				

* C_d é o coeficiente de descarga do bico aspersor utilizado para o cálculo da velocidade inicial da gota de chuva definido como a relação entre a vazão produzida à uma pressão de serviço e a vazão fornecida pelo fabricante. **Observação:** massa de água que sai do bico aspersor coletada em 1 minuto considerando densidade da água de 0,9982 g cm⁻³ a 20°C.

Os resultados da Tabela 4.4 mostram que para o aspersor *fulljet* 1/4"-10SQ-HHSQ os menores erros médios relativos são atingidos para as maiores pressões de serviço, o que não pode ser considerado para o aspersor *fulljet* 1/2"-29SQ-HHSQ. Porém, a escolha do aspersor a ser utilizado no SC não pode levar em conta apenas esse aspecto, ou seja, mesmo tendo erros médios relativos menores, a pressão de serviço de 100 kPa não pode ser adotada, pois geraria alta intensidade pluviométrica, vazões, velocidade e energia cinética, além de pequenos diâmetros de gotas de chuva seriam a maioria.

Portanto, a avaliação das chuvas simuladas seguiu com a análise da uniformidade de distribuição das gotas, por meio do coeficiente de uniformidade de Christiansen - CUC (Christiansen, 1942) e intensidade médias das chuvas simuladas (I_s) para chuvas constantes a partir de pressões de serviços específicas (50, 70, 100 e 150 kPa) que garantissem o diâmetro D_{50} das chuvas naturais (cerca de 2,0 a 2,5 mm para chuvas naturais). Isso foi feito para, posteriormente, serem avaliadas as velocidades terminais (Pérez-Latorre et al., 2010; Sousa Júnior et al., 2017) e a energia cinética das gotas de chuva (van Dijk et al., 2002; Sousa Júnior et al., 2017). Toda metodologia para determinação dessas variáveis já foi descrita no Capítulo 2.

Para determinação e avaliação do CUC, inicialmente utilizou-se área amostral de 1,0 m² (recipiente acrílico inicialmente confeccionado) e, posteriormente, área amostral de 0,25 m² (recipiente acrílico confeccionado com base nas avaliações numéricas sobre o efeito escala avaliado no Capítulo 3). Observa-se na Figura 4.16 que para a determinação dos CUC foram realizados três ensaios para cada pressão de serviço aplicada, apresentando maiores CUC (78 a 86%) o aspersor ½”-29SQ-HHSQ (Figura 4.16b) do que o aspersor ¼”-10SQ-HHSQ (60 a 71% - Figura 4.16a). Apesar do aspersor ½”-29SQ-HHSQ apresentar melhor desempenho de uniformidade, as intensidades médias simuladas são muito elevadas (maiores que 220,0 mm h⁻¹) condizendo a tempos de recorrências de chuvas muito elevados. Já o aspersor ¼”-10SQ-HHSQ não atende o quesito uniformidade proposta por Miguntanna (2009), ou seja, valores maiores que 70%, porém, apresenta intensidades médias simuladas mais adequadas para a região de estudo (cidade de Goiânia, estado de Goiás, Brasil), de aproximadamente 138,0 mm h⁻¹ com pressão de serviço de 70 kPa.

Resultados de CUC muito próximos aos encontrados neste trabalho (Figura 4.16) também foram obtidos por Sphor *et al.* (2015) e Sousa Júnior *et al.* (2017) para áreas de 1,0 m².

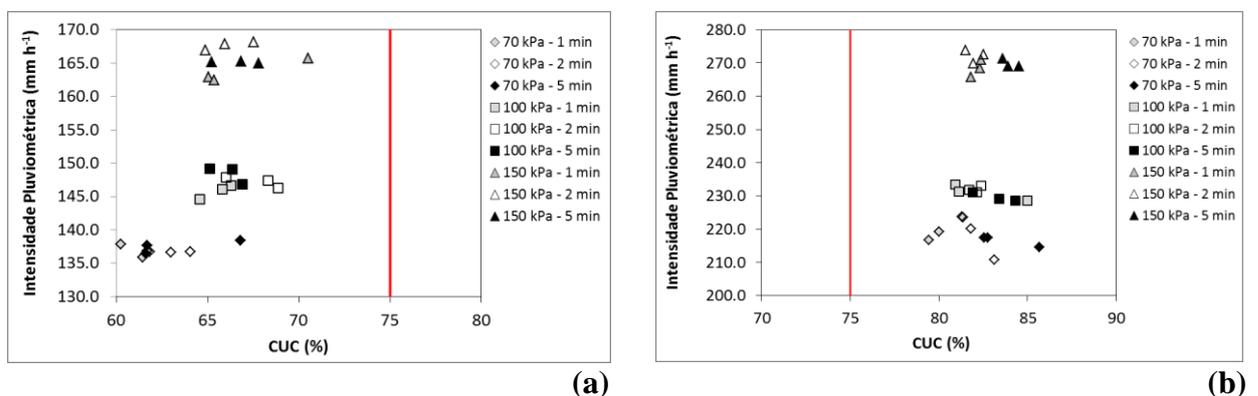


Figura 4.16. Avaliação do CUC em função da pressão de serviço, tempo de simulação e intensidade pluviométrica real média simulada para área experimental de 1,0 m²: a) aspersor *fulljet* ¼”-10SQ-HHSQ jato cone quadrado; b) aspersor *fulljet* ½”-29SQ-HHSQ jato cone quadrado.

Ressalta-se que a altura da chuva simulada para a determinação dos CUC apresentados na Figura 4.16 foi de 1,89 m, com tempo de simulação de 1, 2 e 5 min de chuva constante sobre área de 1,0 m² (amostra), conforme espaçamento entre 25 coletores, distribuídos em uma malha 5,0 x 5,0 cm espaçados em 20 cm, centro a centro, sendo que os coletores das extremidades estavam 10 cm afastados da fronteira (Figura 4.17).

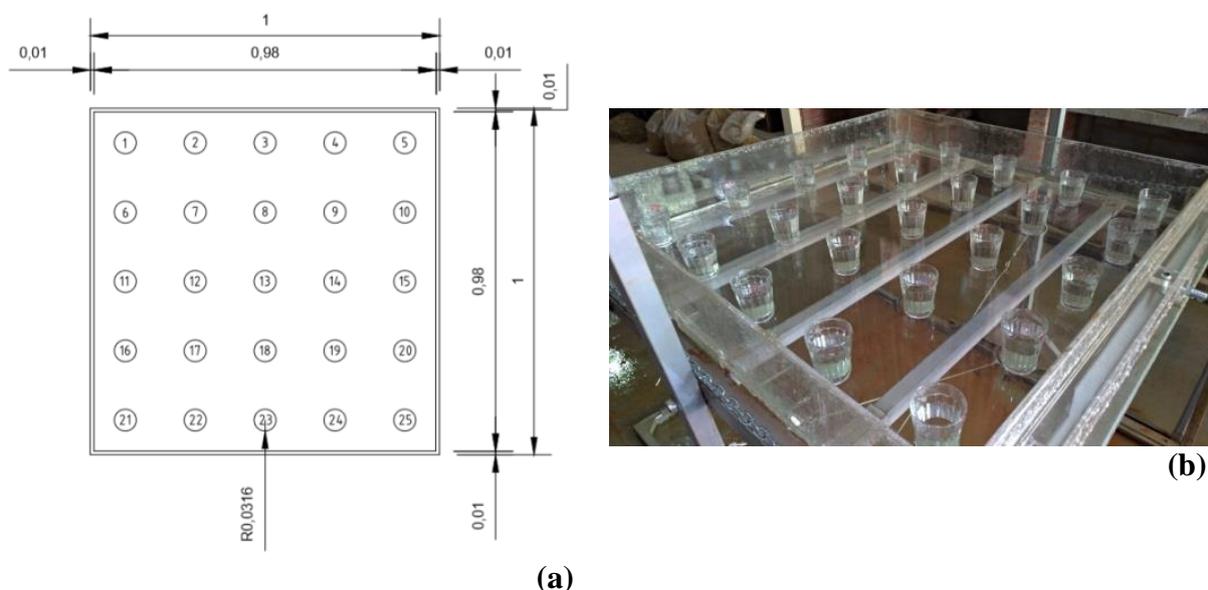


Figura 4.17. Disposição dos coletores de chuva simulada para avaliação do CUC em área 1,0 m²: a) vista superior com identificação; b) após ensaio de 1 min de chuva simulada.

Persistindo com as avaliações de uniformidade (CUC) para o aspersor *fulljet* ¼”-10SQ-HHSQ, pois este atende o quesito intensidade pluviométrica, foram realizados novos ensaios, agora admitindo altura de aplicação da chuva de 1,59 m, pressões de serviço ainda de 50, 70 e 100 kPa, sobre área de 0,25 m² com tempo de simulação de 1 min apenas com chuva constante, na perspectiva de melhorá-los. Utilizou-se apenas o tempo de 1 min de simulação porque foi o que tempo que apresentou significativa influência do CUC (60 a 67%) para pressão de serviço de 70 kPa (Figura 4.16a). A Figura 4.18 ilustra os resultados das novas simulações de chuva, destacando que a uniformidade das chuvas simuladas aumentou 18% em média, apresentando CUC maiores que 70% conforme sugere Miguntanna (2009). Porém, o problema de geração de altas intensidades médias simuladas volta novamente devido à pequena área de amostragem, o que torna necessário a geração de chuvas pulsadas e não constantes para diminuição das intensidades médias simuladas.

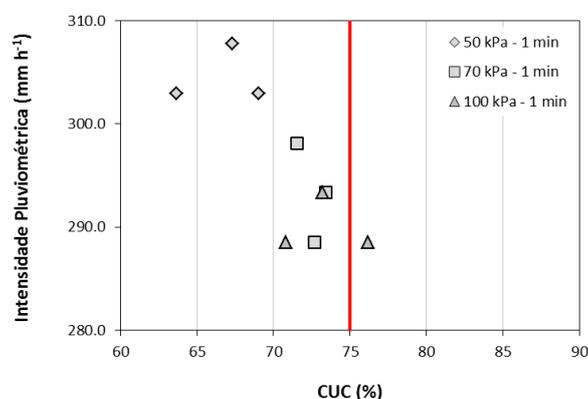


Figura 4.18. Avaliação do CUC em função da pressão de serviço e intensidade pluviométrica simulada para área experimental de 0,25 m² utilizando aspersor *fulljet* ¼”-10SQ-HHSQ jato cone quadrado.

Partindo da premissa de que o CUC atingido para o bico aspersor ¼”-10SQ-HHSQ na parcela experimental de 0,25 m² foi satisfatório (maior que 70%) para a pressão de serviço e altura de aplicação, buscou-se produzir chuvas simuladas com intensidades pluviométricas menores e mais condizentes com a maioria das situações reais de campo (80 a 220 mm h⁻¹). Para isso, avaliou-se a produção de chuvas simuladas não constantes, ou seja, pulsadas com pequenos intervalos de tempo de abertura (t_a) e fechamento (t_f) da válvula solenóide que alimenta o fluxo de água ao bico aspersor, de modo a não perder o comportamento das chuvas constantes e mais próximas das reais (Tabela 4.5). Esse procedimento é comum em SC aspersivos que possuem pequena parcela experimental, os quais necessitam reproduzir chuvas simuladas de menores intensidades como em Alves Sobrinho *et al.* (2008), Abudi *et al.* (2012), Spohr *et al.* (2015) e Sousa Júnior *et al.* (2017).

Existem outros dispositivos para a realização dessa tarefa, como obturadores rotativos, engrenagens que produzem oscilações no eixo do aspersor, entre outros. Porém, optou-se por acionar a válvula solenóide por controlador programável (tipo Arduino) via aplicativo *bluetooth*, aplicando os tempos t_a , t_f e tempo total de duração da chuva simulada, t_{chuva} .

Dessa forma, foram realizados testes para diferentes t_a , t_f e t_{chuva} para a válvula solenóide e verificada a intensidade real simulada nesses tempos de operação (Tabela 4.5), conforme sugerido por Sousa Júnior *et al.* (2017). Destaca-se que foram realizadas pelo menos duas repetições para cada nível de t_a e t_f , sendo apresentados na Tabela 4.5 apenas os valores médios de cada cenário simulado.

Tabela 4.5. Resultados dos experimentos realizados no SC para calibração da intensidade real de chuva simulada considerando diferentes t_a e t_f .

t_a (s)	t_f (s)	t_{chuva} (min)	I_r (mm h ⁻¹)	H_L (mm)	V_c (L)	Q_c (L min ⁻¹)	Q_{c5} (L min ⁻¹)	ξ_r (%)
		5	137	16	0.277	0.055	0.040	27.8
2	3	10	120	20	0.477	0.048	0.050	4.8
		30	116	58	1.314	0.044	0.043	1.8
2	5	30	86	43	0.857	0.029	0.028	2.0
		60	86	86	1.601	0.027	0.026	2.6
3	2	15	188	47	0.876	0.058	0.057	2.4
		30	174	87	3.127	0.104	0.103	1.2
5	1	30	234	117	5.103	0.170	0.166	2.4
		60	227	227	8.082	0.135	0.115	14.6
5	10	30	92	46	0.915	0.031	0.032	4.9
		60	91	91	1.892	0.032	0.031	1.7

sendo: t_a , t_f e t_{chuva} o tempo de abertura, fechamento e total da válvula solenóide programado no PID, respectivamente; I_r a intensidade real simulada; H_L a lâmina de água medida na parcela experimental de 0,25 m²; V_c e Q_c o volume e a vazão captados na calha do SC para o período t_{chuva} , respectivamente; Q_{c5} é a vazão captada na calha do SC para cada intervalo de 5 min de ensaio e ξ_r é o erro médio relativo entre Q_c e Q_{c5} .

Comparando as intensidades pluviométricas reais simuladas apresentadas na Figura 4.18 e na Tabela 4.5, referentes ao bico aspersor ¼”-10SQ-HHSQ, nota-se que a produção de chuvas do tipo pulsadas abrange uma ampla faixa de intensidade pluviométrica com menores intensidades (86 a 234 mm h⁻¹), atingindo o objetivo proposto, ou seja, permitir reproduzir chuvas com tempo de retorno menores e mais comuns de acontecer ao longo do tempo para a área de estudo.

Já a distribuição espacial média das chuvas simuladas para as pressões de 70 e 100 kPa apresentaram padrão semelhante (Figura 4.19) para o aspersor ¼”-10SQ-HHSQ. Para o SC desenvolvido não há mudanças significativas nos padrões de distribuição das chuvas reais simuladas para pressões de serviço acima de 70 kPa, com CUCs variando de 71 a 74% (Figura 4.18). Padrões semelhantes de distribuição de chuvas simuladas utilizando aproximadamente as mesmas pressões de serviço utilizadas neste trabalho (Figura 4.19 e Anexo D) também foram obtidos por Sousa Júnior *et al.* (2017) para área de 1,0 m².

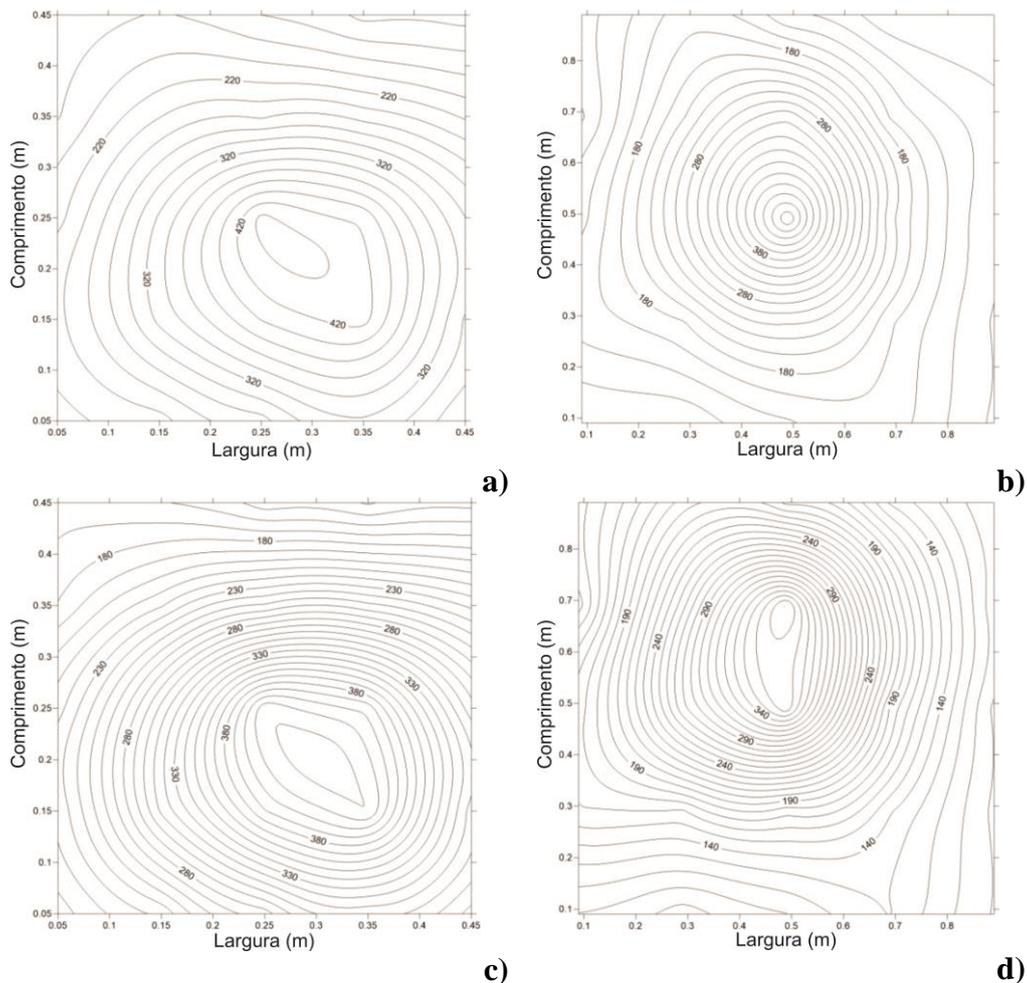


Figura 4.19. Padrões de distribuição espacial médias das chuvas reais simuladas para todos os tempos de simulação para o aspersor ¼”-10SQ-HHSQ jato cone quadrado: a) pressão de 70 kPa e área de 0,25 m²; b) pressão de 70 kPa e área de 1,0 m²; c) pressão de 100 kPa e área de 0,25 m²; d) pressão de 100 kPa e área de 1,0 m².

Outro fato a destacar, observando a Figura 4.19, é que as maiores intensidades pluviométricas reais simuladas estão logo abaixo do bico aspersor (região do centro da parcela amostral), distribuindo-se uniformemente para as extremidades (local onde os sensores de umidade e tensiômetros estão instalados). Isso acarreta em maior energia cinética das gotas de chuva simuladas e, conseqüentemente, maior possibilidade de erodibilidade e carreamento de sólidos do solo sem vegetação, além de formação de pequena bacia de retenção ao longo dos ensaios. As características desses fenômenos físicos percebidos nos ensaios realizados no SC serão avaliadas e discutidas no Capítulo 6.

Todos os resultados referentes aos ensaios de CUC e à determinação das intensidades médias simuladas, além dos gráficos da distribuição espacial das chuvas simuladas para os tempos de 1, 2 e 5 min de simulação, pressões de 50, 70, 100 e 150 kPa para as áreas de 0,25 e 1,0 m², estão disponibilizados nos Anexos D1, D2 e D3, respectivamente.

Com relação à distribuição dos diâmetros das gotas de chuvas, o método de determinação utilizado foi o método da farinha, amplamente detalhado por Carvalho *et al.* (2012), sendo realizado de mesma altura (1,89 m) que o ensaio de uniformidade, porém com tempo de simulação de chuva de 1,0 segundo (um jato apenas) sobre bandeja metálica de 30 x 5 cm, área 0,15 m² (Figura 4.20). Após realizado jato de chuva simulada para cada pressão de serviço (70, 100 e 150 kPa), em triplicata, os grãos produzidos na farinha de trigo pela ação das gotas de chuva simuladas foram secos ao ar por 24 h e secos ao ar por 24 h mais secagem em estufa por 24 h, utilizando os dois aspersores avaliados para determinação da distribuição dos diâmetros das gotas de chuva simuladas (Figura 4.20).

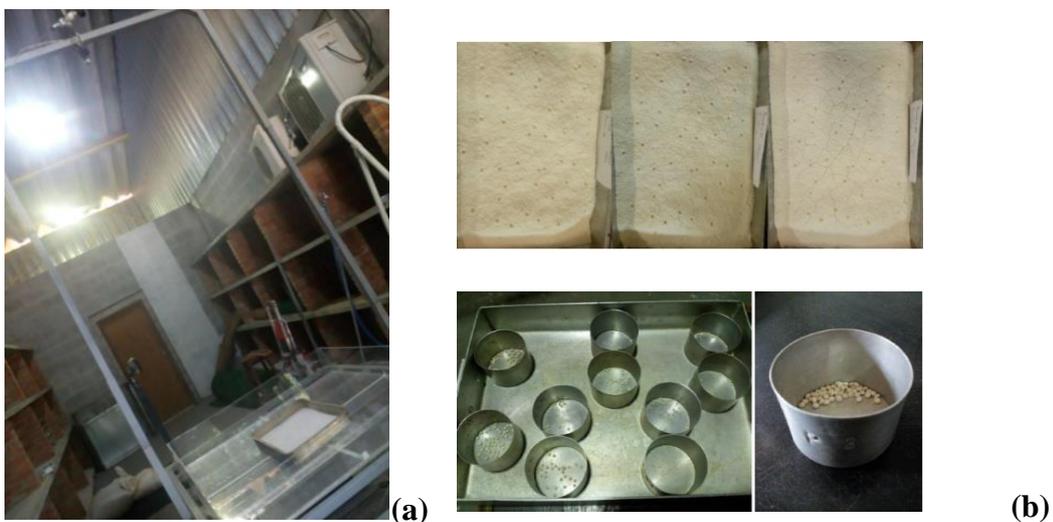


Figura 4.20. Determinação da distribuição do tamanho das gotas de chuva simuladas, método da farinha: a) realização do ensaio no SC; b) separação dos diferentes tamanhos de grãos produzidos.

A maior produção de gotas de chuvas considerando todas as faixas de diâmetros foi alcançada com o aspersor ½”-29SQ-HHSQ para todas as pressões de serviço utilizadas, com destaque para a pressão de 70 kPa, responsável por reproduzir o maior número de diâmetro de gotas de chuvas próximas de 2,0 a 2,5 mm, cujo quantitativo é recomendado por Miguntanna (2009) para chuvas naturais, considerando os dois métodos de secagem utilizados (Figura 4.21a e 4.21b).

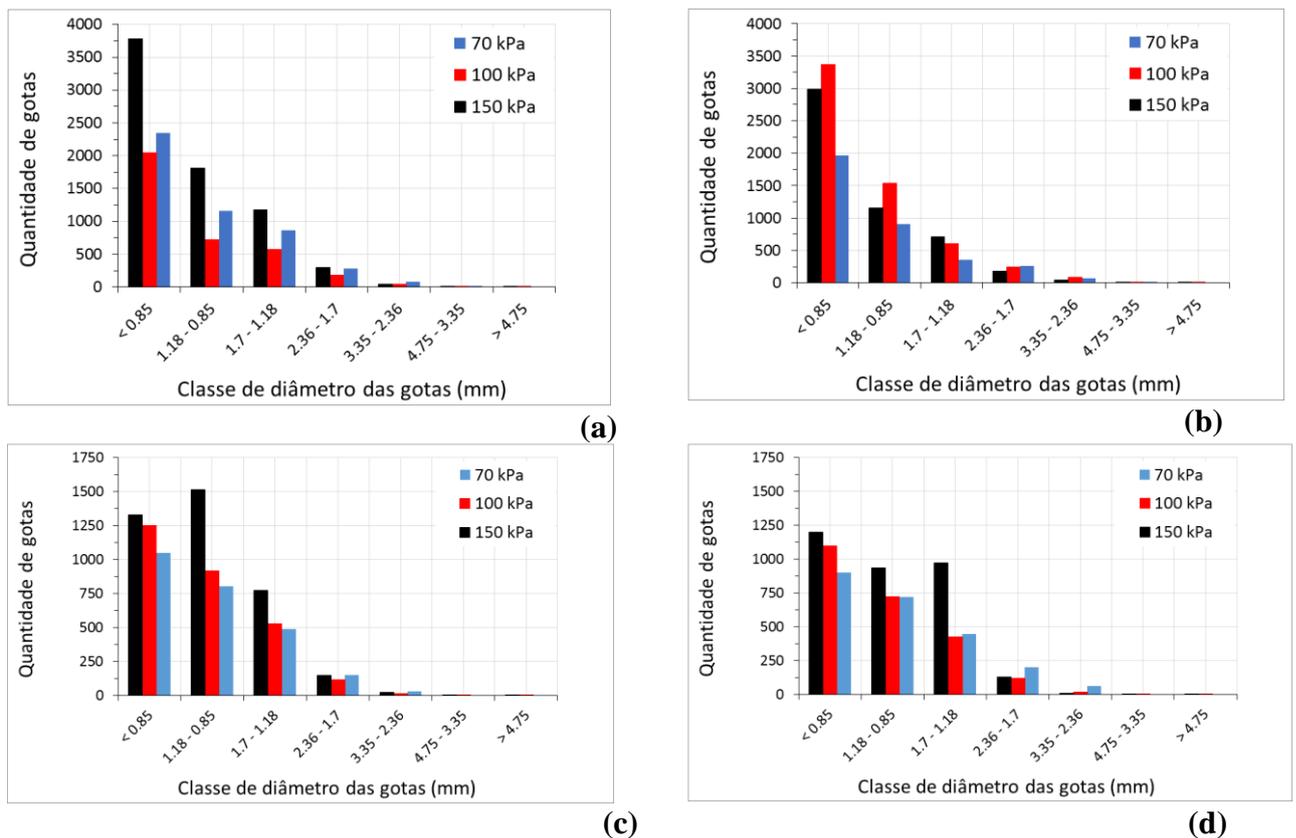


Figura 4.21. Distribuição do diâmetro das gotas de chuvas simuladas (DSD): a) aspersor ½”-29SQ-HHSQ secagem ao ar e estufa; b) aspersor ½”-29SQ-HHSQ secagem ao ar; c) aspersor ¼”-10SQ-HHSQ secagem ao ar e estufa; d) aspersor ¼”-10SQ-HHSQ secagem ao ar.

No geral, percebe-se que o método de secagem ao ar mais estufa gerou maior número de gotas principalmente para as classes de diâmetros menores que 2,36 mm, fato esse que pode estar associado às altas temperaturas da estufa (105° C) com possibilidade de ter desassociado os grãos de maiores diâmetros em menores. Por isso, foram utilizados apenas os resultados do procedimento relativo à secagem ao ar livre para avaliação e determinação do D_{50} (Anexos E1, E2 e E3), para as pressões de serviço de 70, 100 e 150 kPa, apresentando valores de aproximadamente 2,40, 1,51 e 1,49 mm, respectivamente (Figura 4.22a).

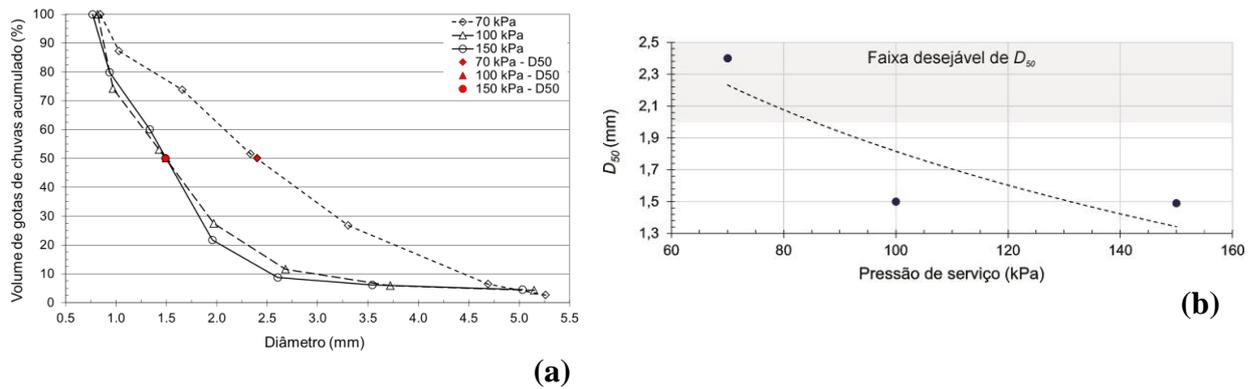


Figura 4.22. Determinação do D_{50} para bico aspersor *fulljet* ¼”-10SQ-HHSQ para área amostral de 0,25 m²: a) em função da DSD acumulada; b) em função da pressão de serviço.

Diante dos resultados satisfatórios de vazão de saída (Tabela 4.4), CUC e intensidades reais simuladas (Figura 4.18 e Tabela 4.5), distribuição do tamanho das gotas de chuvas simuladas e DSD (Figuras 4.21 e 4.22) para o bico aspersor ¼”-10SQ-HHSQ e pressão de serviço de 70 kPa, foram calculadas as velocidades terminais das gotas de chuva simuladas para cada classe de diâmetro. Para isso, foi utilizado *software* especificamente desenvolvido no Matlab, versão R2015a, para resolução numérica das EDP apresentadas por Li & Kawano (1995) e Pérez-Latorre *et al.*, (2010), utilizando método de Runge-Kutta de quarta ordem, com condições iniciais estabelecidas pelo próprio SC e bico aspersor, como altura de queda da gota e velocidade inicial (saída) da gota no aspersor desconsiderando o efeito do vento.

A velocidade inicial da gota de chuva simulada, ou seja, a velocidade teórica da seção contraída de um jato através de um pequeno orifício, necessária para determinação da velocidade terminal, pode ser determinada por uma das mais antigas leis da Hidráulica, conhecida também como teorema de *Torricelli*, sendo:

$$v_i = C_d \sqrt{2gP_{SER}} \quad (4.1)$$

em que v_i é a velocidade inicial de saída da gota do aspersor [LT⁻¹]; C_d o coeficiente de vazão ou descarga, sendo a relação entre a vazão real produzida pelo bico aspersor para determinada pressão de serviço e a vazão de catálogo (Tabela 4.4), adimensional; g é a aceleração da gravidade [LT⁻²] e P_{SER} é a pressão de serviço [L], sendo considerado para cada 1 kPa = 0,1 m de coluna de água.

Assim, a velocidade inicial da gota de chuva simulada pelo bico aspersor ¼”-10SQ-HHSQ, considerando $P_{SER} = 70$ kPa é de 11,25 m s⁻¹. A Figura 4.23a ilustra o comportamento da velocidade das gotas de chuvas simuladas para cada diâmetro médio das classes em função do

tempo (método numérico), sendo que para a determinação da velocidade da gota ao atingir o solo foi utilizado o método trapezoidal para as integrações. Entretanto, a velocidade com que a gota de chuva simulada atinge o solo não foi medida no modelo físico, apenas numericamente.

Para todos os diâmetros médios das gotas de chuva simulada, com exceção do diâmetro médio de 5,26 mm, a velocidade da gota ao atingir o solo foi maior que sua respectiva velocidade terminal, fato esse relacionado à baixa altura de queda da gota de chuva simulada (1,59 m) saindo à alta velocidade inicial (Figura 4.23b). Para que todos os diâmetros médios das gotas de chuva simuladas conseguissem atingir a velocidade terminal ao atingir o solo, seria necessária uma altura de queda maior que 8,0 m (Figura 4.23b), inviável para ensaios em laboratório (devido à restrição de altura do pé direito das edificações) e até mesmo para ensaios em campo (estrutura do SC e efeito dos ventos).

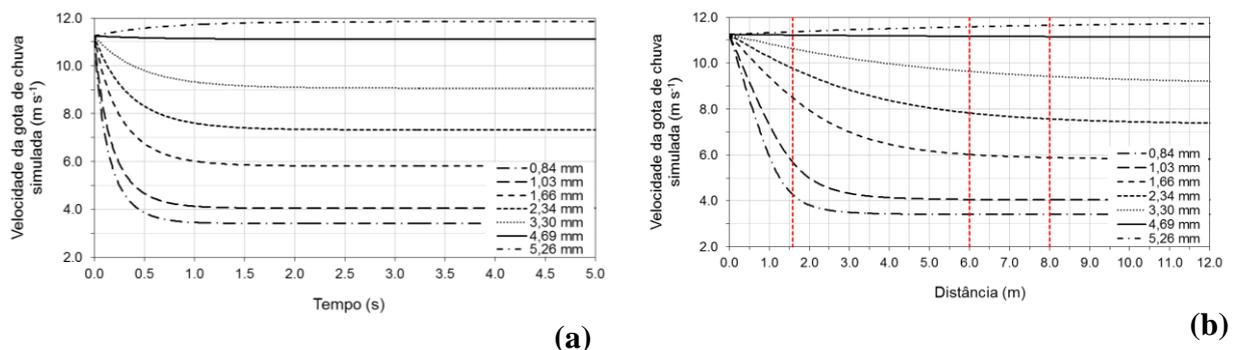


Figura 4.23. Avaliação da velocidade das gotas de chuvas simuladas para cada classe de diâmetro médio produzida pelo bico aspersor *fulljet* 1/4"-10SQ-HHSQ para área amostral de 0,25 m²: a) velocidade em função do tempo; b) velocidade em função da distância percorrida.

Um detalhe importante é que, apesar de ser uma ótima simplificação, assumir a esfericidade da gota de chuva pode ser satisfatório apenas para diâmetros de gota de chuva pequenos. Quando o diâmetro da gota de chuva aumenta, por ser constituída de água, sua forma (geometria) tende a modificar (Figura 4.24) para minimizar a força de resistência do ar (arrasto, ou C_D). Acredita-se que este efeito também ocorre com as gotas de diâmetro menor. No entanto, a diferença entre as forças (na esfera e na forma onde a força é mínima) é pequena. Por isso, os resultados numéricos de velocidade terminal para diâmetros maiores (> 5,0 mm) podem ser avaliados com certa desconfiança, mas não é o caso das chuvas simuladas nesta pesquisa (Figura 4.23).

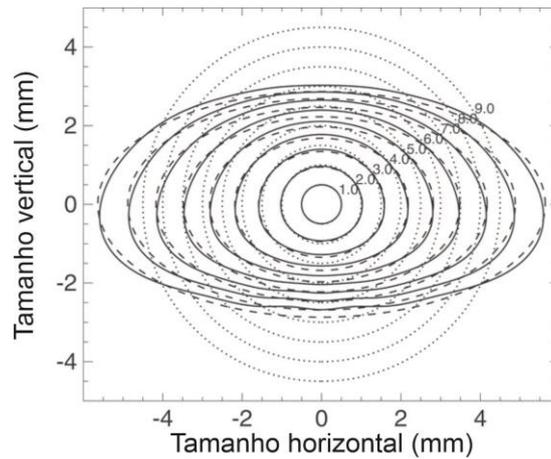


Figura 4.24. Forma da gota de chuva. Fonte: adaptado de Beard & Chuang (1987).

A partir dos valores de velocidades das gotas de chuva simuladas ao atingir o solo serem determinadas, a energia cinética produzida pelas gotas foi calculada utilizando metodologia de Brodie & Rosewell (2007), sendo expressa em termos de energia específica no volume, ou seja, KE_p ($J m^{-2} mm^{-1}$). O valor de KE_p calculado foi de $38,5 J m^{-2} mm^{-1}$, que representa 154,0% da energia cinética produzida por eventos de chuvas naturais com intensidades pluviométricas maiores que $40 mm h^{-1}$, que é de $25,0 J m^{-2} mm^{-1}$ (van Dijk *et al.*, 2002). A alta energia cinética produzida pelas gotas de chuvas simuladas pode refletir em maior erodibilidade, carregamento de partículas e compactação do solo. Porém, devido á presença de vegetação, foco de avaliação desta pesquisa, esses efeitos tendem a ser minimizados ou não mais acontecer, mesmo com energia cinética mais alta. Todos os resultados da metodologia usada para determinação da energia cinética das gotas de chuvas simuladas estão apresentados no Anexo E4.

Ressalta-se que para que se reproduzissem chuvas simuladas com energia cinética igualmente correspondente às chuvas naturais, ou seja, de $25,0 J m^{-2} mm^{-1}$ (van Dijk *et al.*, 2002), seria necessário altura de aplicação de chuva de 6,0 m de altura (Figura 4.23b).

Na Figura 4.25 são apresentadas as porcentagens de energia cinética produzida por cada classe de diâmetro de gotas de chuva simuladas pelo bico aspersor ¼"-10SQ-HHSQ para a altura de 1,59 m. Assim, é possível avaliar que as gotas de chuva com diâmetros entre 1,7 e 3,35 mm são responsáveis pela produção de 60,26% da energia cinética total.

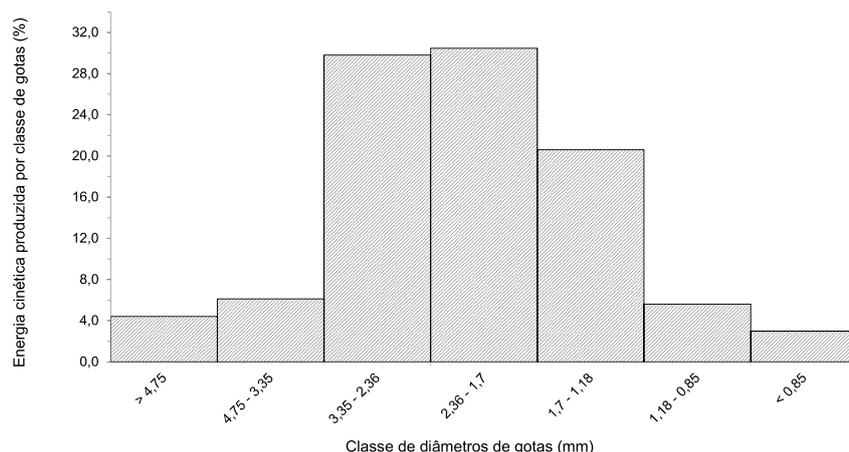


Figura 4.25. Porcentagem de energia cinética produzida para cada classe de diâmetros de gotas para área experimental de 0,25 m² utilizando aspersor *fulljet* ¼”-10SQ-HHSQ jato cone quadrado.

Assim, optou-se por adotar a pressão de serviço de 70 kPa, a qual apresenta: erro médio relativo para a vazão de saída do aspersor de aproximadamente 3,8% com relação ao que o fabricante estabelece; menores e mais condizentes intensidades pluviométricas simuladas; velocidades e energia cinética um pouco maiores que as chuvas naturais. Essa pressão é muito próxima do que sugerem também Sousa Júnior *et al.* (2017) para SC do tipo aspersivos.

Também foram avaliados os volumes precipitados que atingem a área fora da parcela e, principalmente, o que cai na área da calha coletora do fluxo escoado para, posteriormente, serem desconsiderados na determinação do escoamento superficial total (Tabela 4.6). Todas as medições foram realizadas em triplicata para a pressão de serviço (70 kPa), considerando 0,25 m² a área da parcela experimental.

Tabela 4.6. Vazões que atingem a parcela experimental e a calha coletora do fluxo superficial em função da pressão de serviço

Aspersor	Pressão serviço (kPa)	Massa H ₂ O coletada em 1 min (g)*	Volume (mL)	Vazão na caixa acrílica (L/min)	Vazão na caixa acrílica - média (L/min)	Massa H ₂ O coletada em 1 min (g)**	Volume (mL)	Vazão na calha (L/min)	Vazão na calha - média (L/min)
Fulljet Quadrado ¼"	100	1200	1202.1639	1.2022	1.2088	48.08	48.1667	0.0482	0.0482
		1200	1202.1639	1.2022					
		1220	1222.2000	1.2222					
	70	1240	1242.2360	1.2422	1.2222	48.15	48.2368	0.0482	0.0482
		1200	1202.1639	1.2022					
		1220	1222.2000	1.2222					
	50	1280	1282.3082	1.2823	1.2690	48.01	48.0966	0.0481	
		1260	1262.2721	1.2623					
		1260	1262.2721	1.2623					

Observação: *que atinge a parcela experimental de 1 m² em 1 minuto; **que atinge apenas a calha coletora do escoamento superficial; densidade da água de 0,9982 g cm⁻³ a 20°C.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O MODELO FÍSICO (SC)

O SC desenvolvido pode ser utilizado para estudos hidrológicos e geotécnicos com intuito de entender melhor os fenômenos físicos que os envolvem em tempo relativamente curto, padronizados e sem dependência de eventos naturais.

O uso de sistema PID em Arduíno via controle *bluetooth* possibilitou controlar e monitorar automaticamente as pressões de serviços para o módulo chuva garantindo maior controle da uniformidade, distribuição das gotas de chuvas e intensidade das chuvas artificiais ao longo do tempo sobre as amostras de solo com e sem vegetação a serem ensaiadas. O módulo monitoramento se encarrega de registrar e armazenar as mudanças de poropressão e conteúdo volumétrico de água no solo para avaliar a curva característica solo-água e posterior calibração do modelo numérico.

Por fim, entre os aspersores avaliados, sugere-se a utilização do aspersor ¼”-10SQ-HHSQ jato cone quadrado por melhor apresentar as características gerais de chuvas artificiais mais próximas das chuvas reais, atingindo CUC satisfatório de 70% para áreas de 0,25 m² e altura de aplicação de 1,59 m, intensidade pluviométricas reais simuladas mais condizentes com chuvas de tempo de recorrência de 10 a 100 anos (86,0 a 220 mm h⁻¹) e quantidade adequada de gotas de chuva com diâmetros entre 2,0 e 2,5 mm (chuvas reais). Isso possibilitará ensaiar amostras de solo em condições mais reais de campo, seja para avaliar fluxo superficial e subterrâneo, seja para avaliar resistência, erodibilidade, carreamento de sólidos e outros aspectos geotécnicos.

Alerta-se, porém, que tanto a velocidade das gotas de chuva simuladas quanto a energia cinética adquirida foram mais elevadas que para as chuvas naturais de mesma intensidade. Todavia, pouco ou quase desse efeito afetaram os resultados de escoamento superficial monitorados para as amostras ensaiadas sem a presença de cobertura vegetativa. Para as amostras com cobertura vegetativa (gramínea da espécie *Paspalum notatum*) o efeito não se mostrou presente.

5. MATERIAIS E ENSAIOS LABORATORIAIS UTILIZADOS

Este capítulo trata sobre como foram obtidos os materiais (solo com e sem vegetação) e realizados os ensaios laboratoriais para determinação dos parâmetros físicos e hidromecânicos.

São apresentadas também as condições e as considerações na retirada do material deformado (apenas solo) e indeformado (solo com vegetação) e as metodologias de ensaios utilizadas para caracterização geotécnica e hidromecânica.

Os ensaios para a caracterização física e hidráulica do solo utilizado no SC foram realizados conforme os procedimentos da ABNT, exceto os ensaios de curva característica água-solo, devido à falta de normatização. Os ensaios foram:

- granulometria do solo, conforme procedimentos da NBR 7.181 (ABNT, 2018);
- massa específica do solo e massa específica dos grãos do solo, conforme NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR 6.508 (ABNT, 2017), respectivamente;
- compactação do solo para amostras deformadas, conforme metodologia de Araújo (2019);
- curva característica solo-água (CCSA): método *Temp Cell*, placa de pressão (equipamento GCTS) e potenciômetro de ponto de orvalho (WP4C);
- condutividade hidráulica saturada do solo com e sem raízes, obtidas em ensaios triaxiais.

5.1 ORIGEM, COLETA E AMOSTRAGEM DO SOLO

O solo avaliado, utilizado e ensaiado no simulador de chuvas (SC) desta pesquisa é proveniente do Centro de Treinamento do Goiás Esporte Clube, setor Parque Anhanguera, região sudoeste do município de Goiânia, estado de Goiás, Brasil (Figura 5.1), onde amostras dos tipos deformada e indeformada foram coletadas. A escolha do local e do material utilizado se justifica pelo fato de já ter sido amplamente estudado e caracterizado por grupo de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade Federal de Goiás (UFG) e estar preservado em condições mais próximas das naturais, ou seja, não ter sido movimentado, misturado, aterrado ou reaterrado, ser representativo em termos de geração de escoamento superficial, além de possibilitar conhecer o comportamento geotécnico do solo regional do qual o autor da pesquisa reside.

Os estudos do grupo de pesquisa geotécnica da UFG sobre o solo utilizado nesta pesquisa começaram com Araújo (2013) e Kuhn (2014) onde foram avaliados os parâmetros de

compactação de amostras deformadas, condutividade hidráulica saturada, curva característica solo-água para diferentes índices de vazios do solo e resistência ao cisalhamento do solo na condição não saturada, respectivamente. Em seguida, Laguna (2015) avaliou o efeito de diferentes condições de compactação no comportamento mecânico desse solo com ênfase na resistência ao cisalhamento, e por fim, Araújo (2019) determinou curvas características solo-água para diferentes índices de vazios a partir de ensaios de placa de pressão e uso de microtomografia e porosimetria para análise estrutural desse solo e Vaz (2019) avaliou o tempo de equilíbrio e interrupção de fluxo nos ensaios de placa de sucção e pressão.

Nas proximidades da área de estudo (Figura 5.1) localizam-se grandes empreendimentos imobiliários (residenciais) dotados de recentes implantações de infraestruturas como o parque Cascavel e a avenida Marginal Cascavel. Trata-se de um local com topografia uniforme, inclinação de 7%, margeada ao fundo pelo córrego Cascavel (Araújo, 2013).

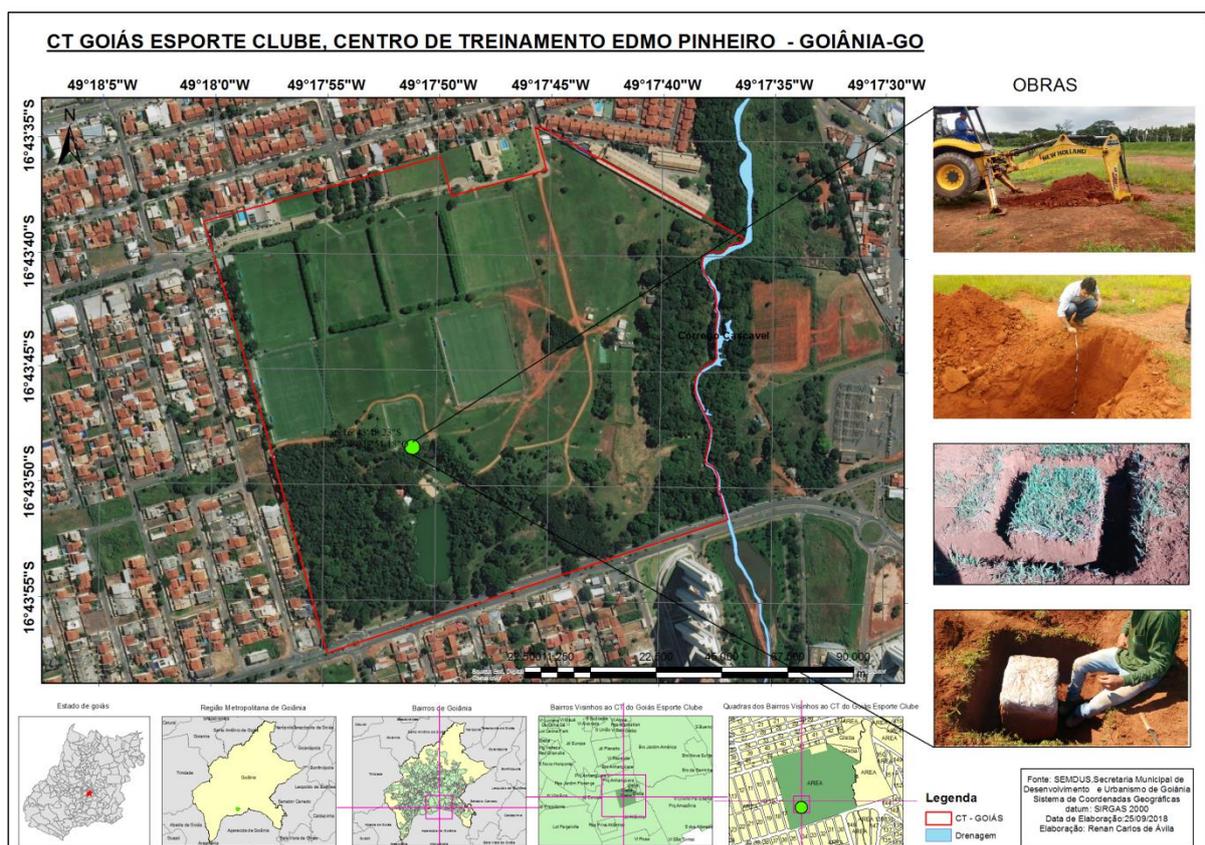


Figura 5.1. Local de retirada do solo (deformado e indeformado) utilizado nos ensaios no SC.

A retirada de amostras deformadas do solo foi realizada de forma mecânica, por retroescavadeira, em profundidade não superior a 1,5 m (Figura 5.1), totalizando aproximadamente 2.500 kg. Também foi retirada amostra do tipo indeformada (bloco indeformado de 47 x 47 x 36 cm, aproximadamente 128 kg), atentando-se para contemplar a

coleta da vegetação nativa presente para avaliação da condutividade hidráulica saturada do solo com influência das raízes (vegetação gramínea do tipo *Paspalum notatum*, ou seja, grama batatais) comum em obras geotécnicas (lado direito da Figura 5.1). Todo o procedimento de retirada e coleta das amostras de solo com vegetação seguiu recomendações da NBR 9.604/2016 (ABNT, 2016), sendo realizado na época não chuvosa da região, ou seja, no segundo semestre do ano de 2017 para as amostras deformadas e na data de 20/03/2018 para a amostra indeformada com vegetação.

As amostras deformadas foram acondicionadas em sacos plásticos para evitar perda de umidade e contaminação, e a amostra indeformada envolta em parafina e acondicionada em caixa de madeira com serragem para auxiliar o transporte para o Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Goiás (UFG) para realização dos ensaios geotécnicos e hidromecânicos.

5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização realizados foram análise granulometria com e sem defloculante NBR 7.181/2018 (ABNT, 2018) e massa específica dos grãos do solo NBR 6.508/2017 (ABNT, 2017), apresentado no Anexo F. Dentre as características físicas medidas do solo (Tabela 5.1), baseando-se nos limites de consistência utilizando a carta de plasticidade de Casagrande (Figura 5.2), classifica-se o solo como argila de baixa plasticidade.

Tabela 5.1. Índices físicos do solo estudado

γ_d (kN m^{-3})	γ_n (kN m^{-3})	G_s	wL (%)	wP (%)	IP
13,5	15,9	2,69	33,2	22,0	11,2

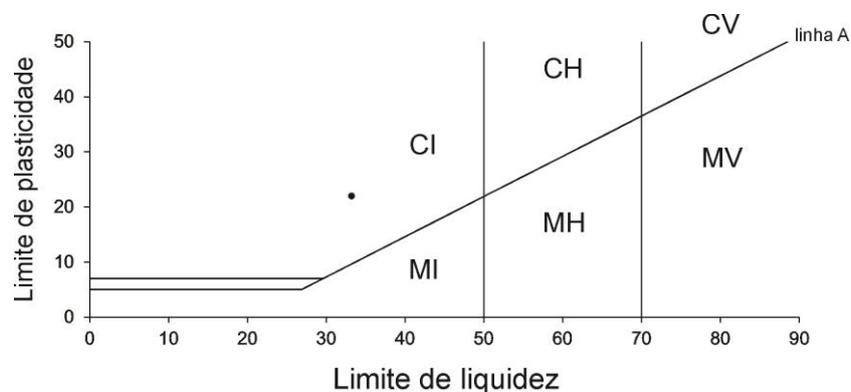


Figura 5.2. Carta de plasticidade de solos. C = argila; M = silte; I, H, V = Intermediária, alta, muito alta plasticidade.

Analisando ainda os dados da Tabela 5.1, em especial o valor encontrado de peso específico dos grãos do solo, a ordem de grandeza média aproxima-se da composição de grãos de quartzo (areia), que é da ordem de 2,65, o que reflete aproximadamente o valor encontrado para o solo tropical analisado. No entanto, não foi realizada caracterização mineralógica do solo utilizado para avaliar a predominância dos minerais de composição.

A análise tátil visual realizada pelo autor da pesquisa também confirma a classificação anterior, pois a consistência e a textura do solo em estudo é característica de solos areno- siltosos.

A Figura 5.3 ilustra as curvas granulométricas do solo em estudo. Sabe-se que a estrutura do solo é influenciada pelo grau de intemperismo. Assim, agentes cimentantes presentes agregam as partículas do solo alterando seu comportamento (macroestrutura), sendo desfeitas na presença do defloculante, característico de solos lateríticos, o que se pode constatar pelo distanciamento das curvas no trecho correspondente da parcela fina do solo.

A granulometria sem a utilização de defloculante é importante para representar o estado do solo em campo e evidenciou um solo com baixa quantidade de argila, sendo classificado como areia siltosa. Com a utilização de defloculante, as cimentações foram desfeitas, apresentando agora aproximadamente 24% de argila. Classificado como areia siltosa, esse solo apresenta boa característica drenante, pois a quantidade de materiais granulares do tipo areia apresenta valores maiores que 30%, além de, apresentar alto índice de vazios típico de argila porosa (Figura 5.3).

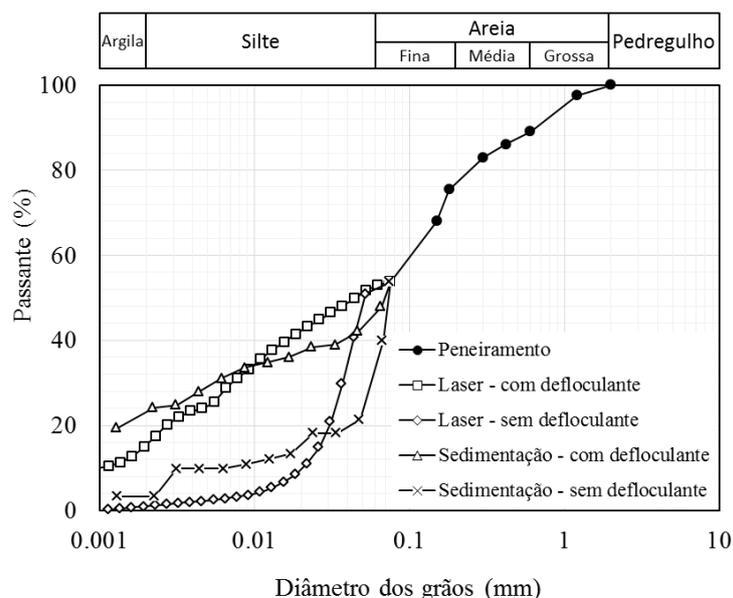


Figura 5.3. Curvas granulométricas do solo utilizado no SC. Fonte: Araújo (2019).

5.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Nesta pesquisa, optou-se por trabalhar com amostras reconstituídas (compactadas) a partir de amostras deformadas, tanto para os ensaios laboratoriais quanto para os ensaios físicos (simulador de chuva - SC). Esse tipo de amostra se justifica por dois principais motivos: o primeiro é a quantidade de tempo demandado para realização de ensaios em solos na condição não saturada e também porque a realização dos ensaios em amostras indeformadas poderia requerer uma maior quantidade de ensaios, devido à maior variabilidade dos resultados e muita dificuldade na extração das amostras, pois as dimensões necessárias para ensaios no SC são significativamente grandes (maiores que 0,5 m para a menor dimensão).

O segundo motivo é a pouca influência que a compactação e, conseqüentemente, a redução da porosidade total causa no comportamento hidráulico dos microporos, ou seja, diâmetros de poros menores que $0,05 \mu\text{m}$. Conforme Figura 5.4, parece que a faixa que corresponde aos microporos e o tamanho médio continuam constantes enquanto o volume total destes aumentam durante o processo de compactação, podendo estar relacionado com a produção de novos poros que se enquadram na faixa de tamanho dos microporos.

Quanto aos macroporos (diâmetros de poros maiores $5,0 \mu\text{m}$), propôs-se a moldagem em diferentes densidades para obtenção de resultados em uma maior faixa de variação desses. Porém, o processo de compactação pode afetar também a coesão do solo bimodal utilizado e, conseqüentemente, modificar as propriedades de erodibilidade e permeabilidade (Figura 5.4). Maiores detalhes são apresentados na metodologia de Araújo (2019).

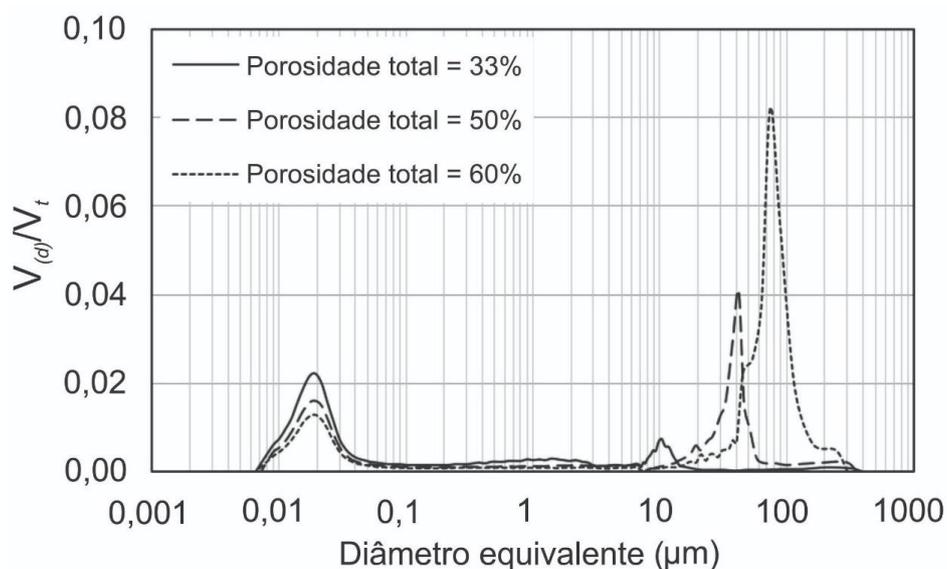


Figura 5.4. Curvas de distribuição de poros obtidas a partir de ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio do solo utilizado no SC. Fonte: Araújo (2019).

As amostras reconstituídas, geralmente, passam por um processo de compactação que, por sua vez, pode ser realizado de duas maneiras distintas, a saber: compactação dinâmica ou compactação estática.

O procedimento de compactação dinâmica baseia-se na aplicação de golpes por um soquete padronizado para obtenção do índice de vazios desejado. Na compactação estática, a carga é aplicada por um pistão por velocidade constante com monitoramento da deformação do solo até atingir o volume desejado correspondente às características físicas de interesse. Vários autores utilizam a técnica de compactação estática para produção de corpos de prova (CP) com características homogêneas (Kuhn, 2014; Leong *et al.*, 2002).

Apesar da vasta quantidade de bibliografia a respeito do tema, detalhes primordiais como: espessura da camada, energia perdida no atrito lateral, homogeneidade, influência da velocidade e umidade de preparação, além da ausência de modelagem do comportamento do CP frente à compactação, não são apresentados de forma completa e discutidos.

Assim, todo o processo de preparação, umedecimento e compactação do solo utilizado neste trabalho, baseou-se nos quesitos da NBR 7.182 (ABNT, 2016a) e metodologia utilizada por Araújo (2019). Foi dedicado grande esforço para padronização da produção dos CP a partir do controle da massa e da altura das camadas, sendo no total sete camadas idênticas, verificadas a partir do deslocamento do pistão da prensa hidráulica utilizada. Tomou-se como critério de aceitação as camadas com $w_{ótima} \pm 0,5\%$ em torno da umidade alvo, conforme adotado por Leong *et al.* (2002).

Dessa forma, apesar do teor de umidade ótima a partir dos ensaios de compactação Proctor normal realizados por Araújo (2019) indiquem 20,0% como o valor mais indicado (Figura 5.5), foi considerada umidade ótima de trabalho de 18%, pois diante dos diferentes índices de vazios utilizados pelo autor (0,5, 1,0 e 1,5), a produção de corpos de prova com índice de vazios de 0,5 era de extrema dificuldade, pelo fato de que durante o processo de compactação a água podia sair do molde afetando a qualidade do ensaio (caso fosse adotada umidade de 20,0%), além de acarretar possíveis processos prematuros de formação de erosões advindos das simulações de chuva no SC pela estrutura não resistente dessa condição do solo.

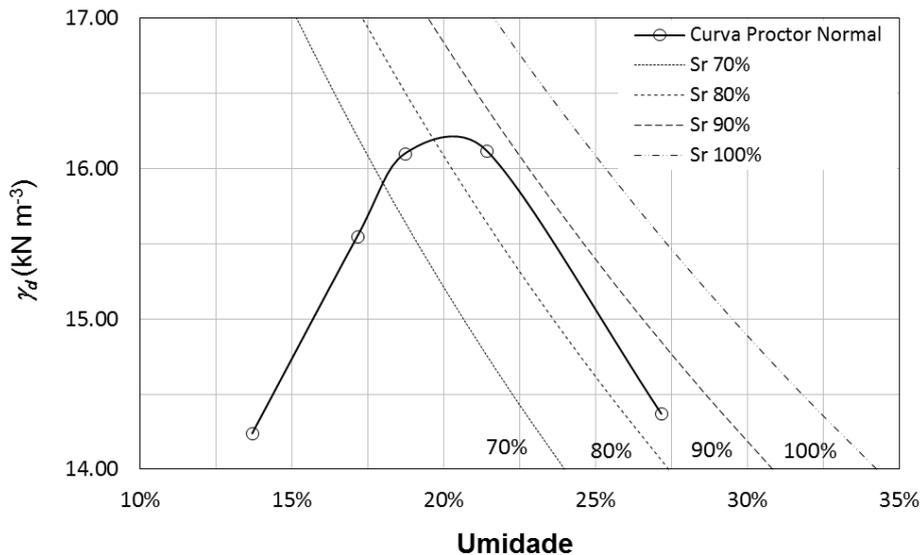


Figura 5.5. Curvas de compactação utilizando Proctor normal. Fonte: Araújo (2019).

5.4 CURVA CARACTERÍSTICA SOLO-ÁGUA

Conforme Fredlund (2002) e Fredlund (2006), a principal propriedade dos solos não saturados é a curva característica solo-água. Ela demonstra como a sucção se comporta com a variação do conteúdo de água presente no solo, nas etapas de distribuição, retenção e liberação de água (Gitirana Jr. *et al.*, 2015).

Fredlund & Rahardjo (2012) destacam que outras propriedades e detalhes do comportamento dos solos não saturados podem estar intimamente correlacionados com a curva característica solo-água, sendo elas: resistência ao cisalhamento do solo e condutividade hidráulica, principalmente.

Portanto, para obtenção da curva característica solo-água é necessário abranger todas as faixas de sucções que o solo pode ser submetido e, portanto, algumas metodologias de ensaios foram utilizadas (Figura 5.6). A primeira técnica para obtenção da CCSA de secagem e molhagem, com base nas sucções matriciais entre a faixa de 0 a 1.500 kPa, foi a placa de pressão (Figura 5.6a), proposta por Richards (1941), e baseia-se no procedimento de translação do eixo. A amostra é colocada dentro de uma câmara fechada e em contato com uma interface ar-água com alto valor de entrada de ar (VEA) saturada com água. A interface de VEA evita que o ar livre escape da câmara enquanto permite a drenagem ou absorção de água.

Durante o ensaio foi utilizada uma cerâmica de alto valor de entrada de ar de 100 kPa, e as amostras foram submetidas às sucções matriciais de 4, 10, 14, 20, 30, 40, 60, 80 e 100 kPa. Mais detalhes do procedimento de ensaio podem ser encontrados em Kühn (2014).

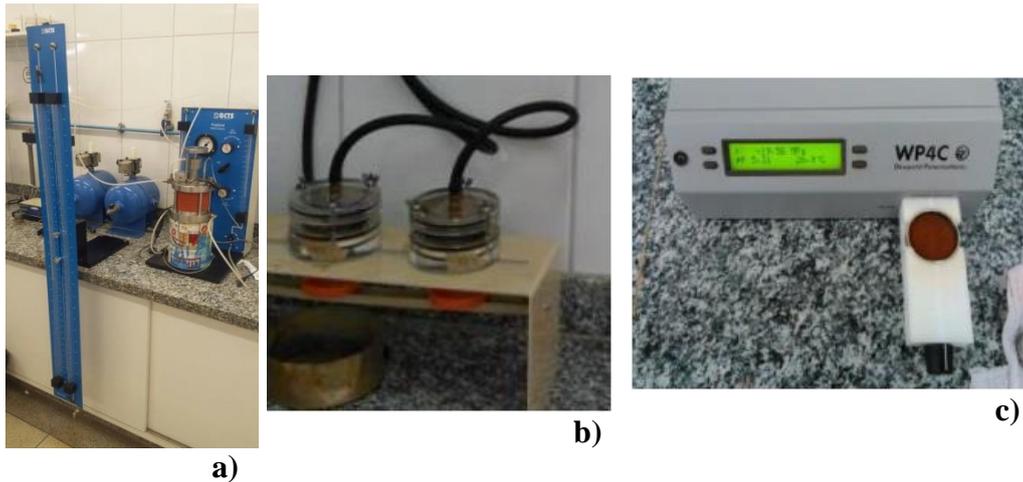


Figura 5.6. Equipamentos utilizados para determinação da CCSA: a) placa de pressão (GDS); b) *Tempe cell* e c) potenciômetro de ponto de orvalho, WP4C. Fonte: adaptada de Laguna (2015).

Os testes de placa de pressão empregaram o dispositivo SWC-150, desenvolvido pela *GCTS Testing Systems* (Tempe, AZ, EUA). A saturação foi atingida pelo aumento capilar sobre uma cerâmica com alto valor de entrada de ar de 1 bar (altura da cerâmica de 10 mm, permeabilidade de $9 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$), por 24 h, aplicando pressão positiva de 0,4 kPa no fundo da amostra. Após a saturação, o excesso de água dentro da câmara foi drenado, a placa de pressão foi selada e as sucções matriciais foram aplicadas em etapas de 0,1 a 0,2 kPa, até que a entrada de ar fosse alcançada. Em seguida, incrementos de pressão cada vez maiores foram aplicados à amostra. A precisão estimada das leituras de sucção foi $\pm 0,05 \text{ kPa}$ de 0 a 10 kPa e $\pm 2 \text{ kPa}$ de 10 a 200 kPa. Tempos de equilíbrio hidráulico variaram de 3 a 7 h para a maioria dos incrementos de sucção. No entanto, alguns incrementos requereram mais de 12 h para o equilíbrio (Vaz, 2019).

A segunda técnica utilizada foi mediante *Tempe cell* (Figura 5.6b) e, por último, a utilização do potenciômetro de ponto de orvalho (WP4C) para medição de sucções totais com valores acima de 100 kPa (Figura 5.6c). Nesta pesquisa foram utilizadas as curvas características solo-água com trajetórias de molhagem e secagem determinadas por Araújo (2019), pois trata-se do mesmo solo desta pesquisa, oriundo do mesmo local, profundidade e data de coleta.

Já a técnica de translação de eixos permite a imposição da sucção por meio da mudança de referência da pressão atmosférica pela imposição de pressão artificial de ar na superfície do solo. Esta técnica, placa de pressão, foi realizada com o equipamento *Tempe cell* (Figura 5.6b), onde amostras de solo em umidade de estudo (18%) foram compactadas em um anel de aço próprio do equipamento e colocadas sobre uma pedra porosa imersa em água para sua saturação. Após a saturação, as amostras foram instaladas no conjunto *Tempe cell*, acima da cerâmica de alto valor de entrada de ar (VEA), a qual foi previamente saturada.

O potenciômetro de ponto de orvalho, modelo WP4C, é um equipamento para medir o potencial de água (i.e. sucção total) de qualquer meio poroso, sendo um instrumento rápido, preciso e confiável. A sucção total é calculada a partir da pressão de vapor do ar em equilíbrio com uma amostra em uma câmara selada de medição (Figura 5.6c).

A câmara selada contém um espelho que detecta a condensação sobre o mesmo, sendo a temperatura controlada por uma resistência (*Peltier*). A detecção do ponto de orvalho exato em que é dada a condensação pela primeira vez é observada com uma célula fotoelétrica. Um feixe de luz é dirigido para o espelho e refletido para um fotodetector, sendo registrada a temperatura na qual ocorre a condensação e os valores para começar as leituras iniciais.

O tempo de leitura é de aproximadamente 10 a 15 min para amostras de solo em modo preciso, 20 min para amostras de tecido vegetal e menor que 5 min para leituras em menor precisão. Recomenda-se evitar diferenças entre a temperatura das amostras de solo e a temperatura do equipamento, garantindo a qualidade das medições de sucções, pois a diferença de temperatura pode interferir no tempo de leitura (mais longos) podendo causar erros nas medições de condensação.

Entretanto, para o ajuste da curva característica solo-água, a literatura apresenta inúmeras funções de ajuste como, Burdine (1953), Brooks & Corey (1964), Mualem (1976), van Genuchten (1980), Fredlund & Xing (1994) e Fredlund *et al.* (1994), porém, optou-se para esta pesquisa utilizar equação proposta por Gitirana & Fredlund (2004) para solos com comportamento bimodal, devido ao bom ajuste proporcionado (Figura 5.7). Os parâmetros de ajuste da equação de Gitirana & Fredlund (2004) em função do conteúdo volumétrico de água e sucção podem ser visualizados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Parâmetros de ajuste das curvas características solo-água (Gitirana Jr. & Fredlund, 2004)

Tipo de curva (CCSA)	ψ_{b1} (kPa)	ψ_{res1} (kPa)	S_{res1} (%)	ψ_{b2} (kPa)	S_b (%)	ψ_{res2} (kPa)	S_{res2} (%)	a_1	a_2	a_3	a_4
Secagem principal	3,0	7,0	46,00	12.500,0	26,0	22.000,0	2,0	0,080	0,200	0,080	0,080
Molhagem	0,3	7,0	44,00	12.500,0	29,0	22.000,0	4,0	0,080	0,080	0,080	0,080
1º Secagem	2,5	15,0	50,00	11.500,0	30,0	22.000,0	4,0	0,080	0,120	0,080	0,080

As Figuras 5.7a até 5.7d ilustram as curvas características solo-água de molhagem e secagem ajustadas, destacando o comportamento bimodal com presença de micro e macroporos. Este tipo de distribuição de poros é causado por granulometrias descontínuas ou pela estruturação de solos intemperizados. Os macroporos têm valor de entrada de ar entre 0,4 e 3,5 kPa e os microporos entre 10.000 e 12.500 kPa (curva secagem).

A curva característica solo-água de secagem principal é ajustada a partir dos resultados de ensaios com CP em condições de saturação ascendente capilar submetidos a estágios de sucções dos quais são possíveis determinar as mudanças no conteúdo volumétrico de água. Eles são, em seguida, umedecidos (curva de molhagem) e secados novamente (curva 1º secagem), sendo essa sequência a trajetória das curvas características solo-água. Assim, como as amostras ensaiadas no SC foram preparadas a partir da condição de secagem hidrocópica, homogêneas, umedecidas, compactadas e submetidas à precipitação, elas devem a partir da condição inicial dos ensaios (umidade, conteúdo volumétrico de água e sucção), ser analisadas e posteriormente calibradas no modelo numérico a partir da trajetória secagem principal-molhagem, que é a mais representativa do fenômeno físico simulado.

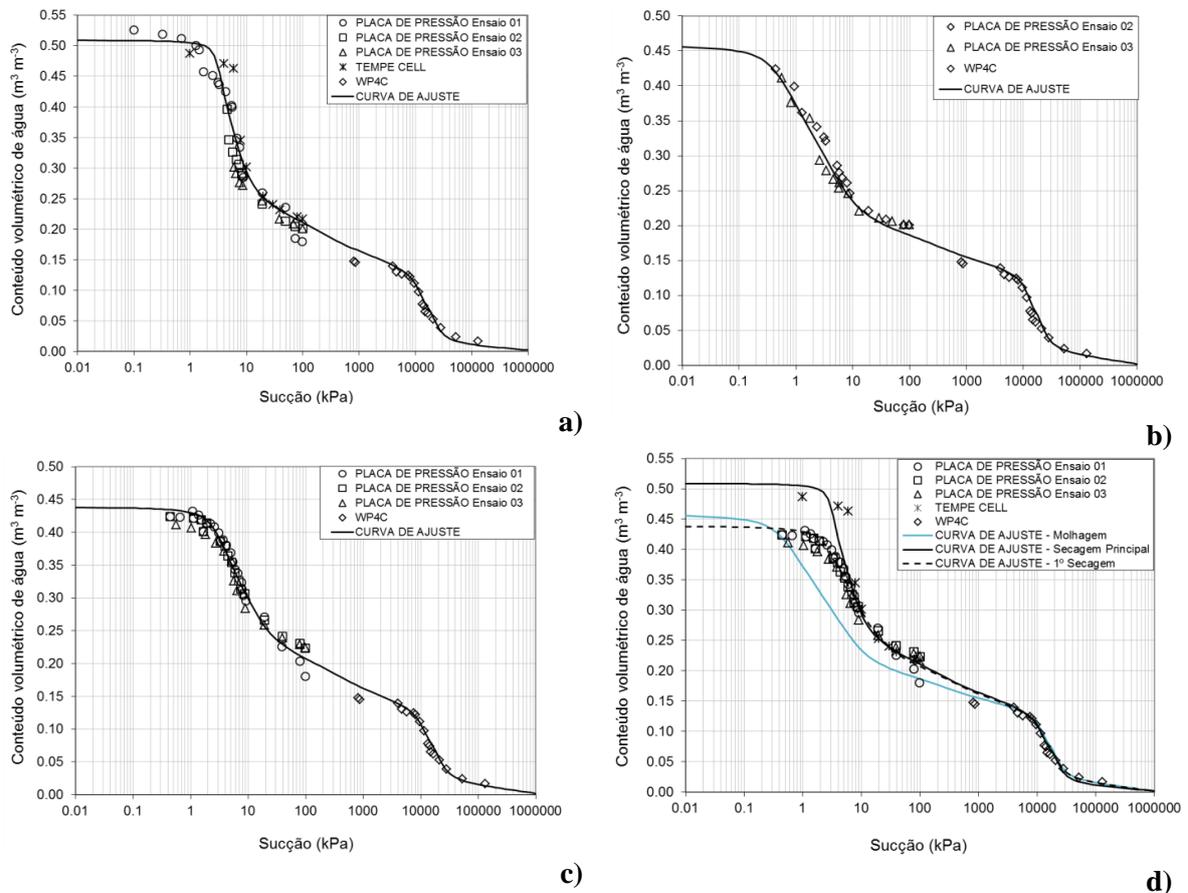


Figura 5.7. Curvas características solo-água referentes às amostras compactadas (reconstituídas) com $e = 1,0$ ajustadas conforme proposta de Gitirana Jr. & Fredlund (2004): a) secagem principal; b) molhagem; c) 1º secagem e d) todas.

Nota-se nas curvas características água-solo (Figura 5.7) patamares que indicam a ausência de poros em uma faixa de tamanhos. A posição do patamar indica o volume de macroporos presentes na estrutura do solo.

5.5 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA

Para a determinação da condutividade hidráulica saturada do solo foi utilizado o equipamento triaxial, disponível no Laboratório de Mecânica dos Solos Não Saturados da Universidade Federal de Goiás (UFG). Destaca-se aqui que foram determinadas as condutividades hidráulicas saturadas de amostras reconstituídas, conforme metodologia proposta por Araújo (2019), descrita no Item 5.3 deste capítulo, e também de amostras indeformadas com presença de raízes (espécie gramínea *Paspalum notatum*), a qual é proveniente da área de estudo. Apesar de não ser objetivo deste trabalho, também foram determinados os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo indeformado com as raízes, no sentido de entender melhor como a presença das raízes podem e afetam o comportamento do solo.

O equipamento triaxial utilizado (Figura 5.8) é composto principalmente por: a) câmara triaxial do tipo *Bishop-Wesley*, com deslocamento vertical imposto por pedestal móvel; b) quatro controladores de pressão/volume, sendo um para confinamento da câmara triaxial, um para pressão na base, um para o topo do corpo de prova (CP) e um para deslocamento do pedestal; c) transdutor de poropressão; d) transdutor de deslocamento vertical (LVDT) e célula de carga interna submersível, *serial pad*, para recepção dos sinais de transdutores e envio ao PC; e) controlador pneumático para aplicação e controle de pressões confinante de ar e poropressão de ar; f) computador e *software* específico para recepção dos dados (Laguna, 2015).



Figura 5.8. Equipamento triaxial utilizado.

Para os ensaios triaxiais, os CP foram moldados sempre buscando atender as dimensões estabelecidas pela capacidade do equipamento, ou seja, formato cilíndrico com diâmetro de 38 mm e altura de 76 mm, porém para os CP com presença de raízes houve dificuldade de moldagem (Figura 5.9) e o diâmetro e a altura média dos CP ficaram em torno de 37,6 a 38,3 mm e de 75,3 a 77,0 mm, respectivamente, diferenças essas que lançadas no equipamento triaxial, não afetam os resultados.

No total, foram moldados doze CP, três apenas para solo compactado (reconstituído) com umidade de 18% e índice de vazios de 1,0 e nove CP de solo com raízes da espécie *Paspalum notatum* (indeformado), sendo três CP para cada profundidade do solo, CP_{1i}, CP_{2i} e CP_{3i} para o topo, meio e fundo da amostra, em que *i* varia de 1 a 3, ou seja, em triplicata.

A Figura 5.9 ilustra processo de moldagem do CP para o solo composto com raízes (*Paspalum notatum*), destacando detalhes, profundidades, materiais e até presença biológica (minhocas) na profundidade de 25 cm.

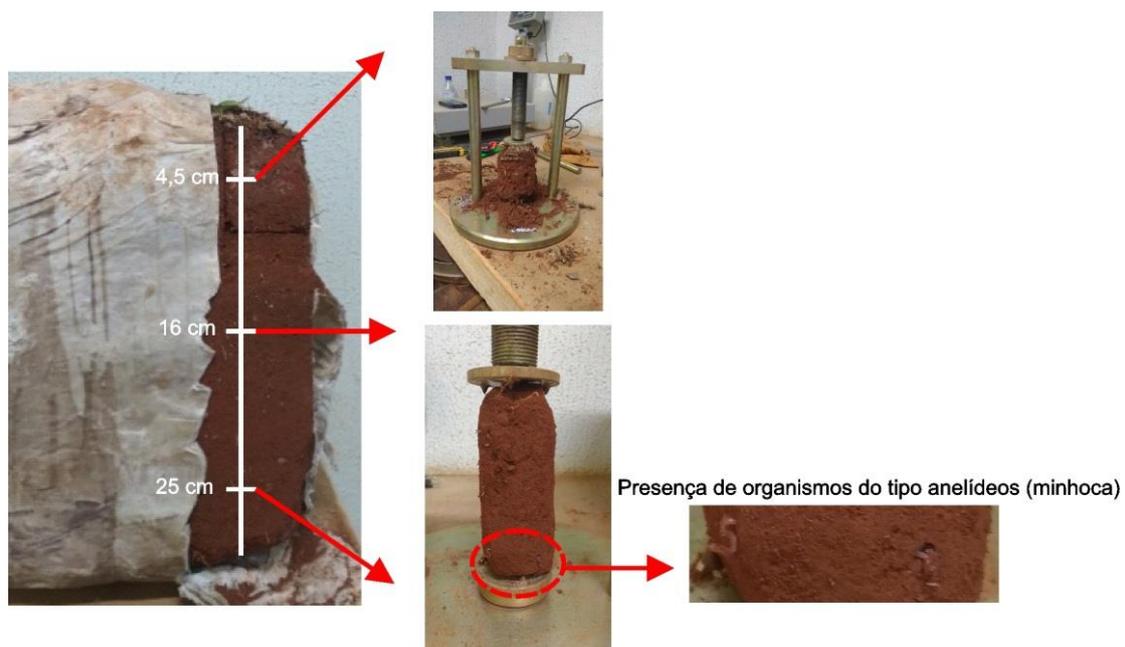


Figura 5.9. Processo de moldagem dos CP indeformados com presença de raízes da gramínea *Paspalum notatum* (grama batatais).

Após a moldagem, verificou-se homogeneidade dos CP de solo compactado no que se refere a dimensões, peso específico, umidade gravimétrica e índice de vazios. Os valores médios de umidade e índice de vazios dos CP compactados foram próximos aos valores especificados, apresentando coeficiente de variação de 1% e desvio padrão de 0,07 aproximadamente, na umidade de compactação, demonstrando baixa variabilidade com relação aos valores máximos e mínimos, dentro da faixa de variação estabelecida de $\pm 10\%$, enquanto o índice de vazios

apresentou coeficiente de variação de aproximadamente 2% e desvio padrão de 0,017 (Araújo, 2019).

Para os CP indeformados, composição de solo mais raízes (*Paspalum notatum*), houve maior variabilidade dos resultados (Tabela 5.3), principalmente com relação ao teor de umidade da camada superficial (topo). Porém, tanto o coeficiente de variação (1,94 a 4,41%) quanto o desvio padrão (0,03 a 0,43) apresentaram-se dentro da faixa de variação de aceitabilidade, ou seja, menor que 10%, com exceção de apenas um CP da camada mais superficial.

Tabela 5.3. Propriedades dos CP com solo indeformado e raízes moldados para os ensaios triaxiais

Parâmetro	CP	CP 1.	CP 2.	CP 3.	Parâmetro	CP	CP 1.	CP 2.	CP 3.	Parâmetro	CP	CP 1.	CP 2.	CP 3.
w (%)	.1	15.77	18.10	17.21	γ_n (kN m ⁻³)	.1	15.83	15.82	16.07	e	.1	0.97	1.01	0.96
	.2	15.79	18.25	16.58		.2	15.67	16.11	15.42		.2	0.99	0.97	1.03
	.3	12.14	18.79	16.41		.3	14.90	15.49	15.32		.3	1.03	1.06	1.04
Média	14.57	18.38	16.73	Média	15.47	15.81	15.60	Média	0.99	1.02	1.01			
σ	2.10	0.36	0.43	σ	0.50	0.31	0.41	σ	0.03	0.04	0.04			
CV	14.43	1.97	2.55	CV	3.23	1.94	2.61	CV	3.24	4.35	4.41			

Diante dos resultados apresentados pela Tabela 5.3, percebe-se a influência e a importância da vegetação no perfil de umidade para as diferentes profundidades avaliadas. Mesmo tendo sido coletadas em período de estiagem, o solo permanece com maior umidade nas maiores profundidades avaliadas (16 e 25 cm da superfície), apresentando-se menos saturada na superfície, admitindo que para futuros eventos chuvosos, se comporte como uma esponja absorvendo o máximo de precipitação e liberando-a de forma gradativa no perfil de solo ao longo do tempo.

O baixo desvio padrão relacionado ao índice de vazios médio dos CP moldados e ensaiados (Tabela 5.3) justifica e reforça a escolha por $e_0 = 1,0$ para reconstituição de amostras de solos compactados para uso no simulador de chuvas (ensaio físico).

Com relação aos teores de umidades (Tabela 5.3) para os CP em diferentes profundidades, destaca-se menores valores para os CP da superfície (CP1). Isso também foi determinado nos estudos de Rahardjo *et al.* (2016) no que tange à espécie Orange Jasmine (*Murraya exotica* L.), destacando a importância da vegetação na manutenção da sucção mátrica das camadas mais superficiais do solo, conseqüentemente, tendo maior resistência ao cisalhamento do solo.

Os ensaios triaxiais saturados realizados foram do tipo CD (adensado drenado), por representar melhor a condição real (de campo) onde é permitida a drenagem do CP durante as fases de

consolidação e cisalhamento (ruptura) com dissipação total das poropressões e bom controle das tensões efetivas.

Inicialmente, realizou-se a saturação dos CP. Os CP compactados (reconstituídos) e indeformados com raízes foram submetidos à percolação ascendente com tensão confinante efetiva de 20 kPa. A água que percolou da base até o topo do CP foi coletada e o fluxo foi mantido até o volume percolado atingir duas vezes o volume da amostra. Todo esse processo durava em média 25 min.

Em seguida, foram aplicadas ao CP condições de tensão confinante de 520 kPa e contrapressão de 500 kPa, mantendo tensão efetiva de 20 kPa por meio de rampa de saturação com tempo total de 24 h. O próximo passo foi elevar a tensão confinante para 570 kPa no intuito de verificar se o mesmo ocorria com o incremento de poropressão, avaliando-se dessa forma o parâmetro B, que sempre foi igual ou maior que 0,97. A grande vantagem do equipamento triaxial é a garantia, por meio de contrapressão, da saturação da amostra, mantendo-se tensão efetiva suficiente para impedir ou minimizar fluxo entre a membrana e o CP.

Por fim, considerando que a altura do CP não sofre mudança, foram impostas três diferentes cargas hidráulicas (10, 15 e 20 kPa, considerando que 1 kPa = 10 cmH₂O) a partir de modificações nas tensões aplicadas aos CP pelo equipamento triaxial, para que houvesse o aumento de vazão pelo CP e, conseqüentemente, verificar se influenciava na determinação da condutividade hidráulica saturada para CP reconstituídos com índice de vazios de 0,5, 1,0 e 1,5 (Figura 5.10b) e indeformado com raízes da espécie *Paspalum notatum* (Figura 5.11). Para os CP indeformado com raízes da espécie, que apresentavam maior índice de vazios, as cargas hidráulicas impostas foram 5, 10 e 15 kPa, devido limitações do equipamento no que se refere à quantidade de água utilizada nos ensaios de condutividade hidráulica (bombas hidráulicas).

Durante o processo de saturação por contrapressão, procurou-se manter as tensões na base e no topo do CP com mesmo valor. Porém, para que haja fluxo, na etapa do ensaio de condutividade hidráulica saturada, aplicou-se um gradiente hidráulico diferenciando essas tensões. O equipamento sugere que o fluxo seja descendente, ou seja, a tensão da base deve ser menor do que a tensão do topo. Nos dois primeiros gradientes (10 e 15 kPa) a diferença é imposta apenas no topo, elevando a tensão no valor da carga hidráulica desejada. Na última carga hidráulica (20 kPa), por ser um valor elevado e próximo à tensão confinante, a carga hidráulica é aplicada reduzindo-se a tensão na base e aumentando-se a tensão do topo, assim a variação em cada extremidade é menor.

Os resultados indicaram pouca influência nos valores de condutividade hidráulica saturada, sendo mais influenciados quando submetidos a menores gradientes hidráulicos e, conseqüentemente, em condições de menores vazões (Figura 5.10a).

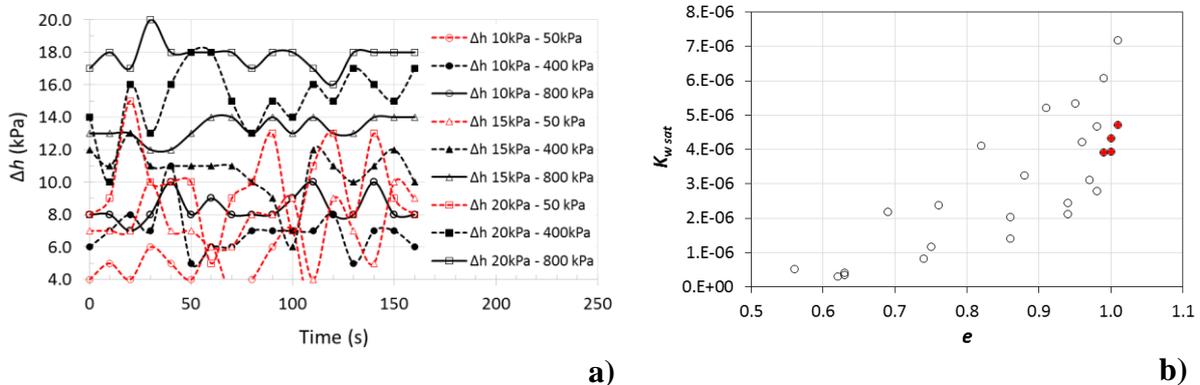


Figura 5.10. Avaliação da condutividade hidráulica saturada dos CP compactados (reconstituídos) em função a) da carga hidráulica aplicada nos ensaios triaxiais, conseqüentemente, gradiente hidráulico; b) dos índices de vazios. Fonte: adaptado de Araújo (2019).

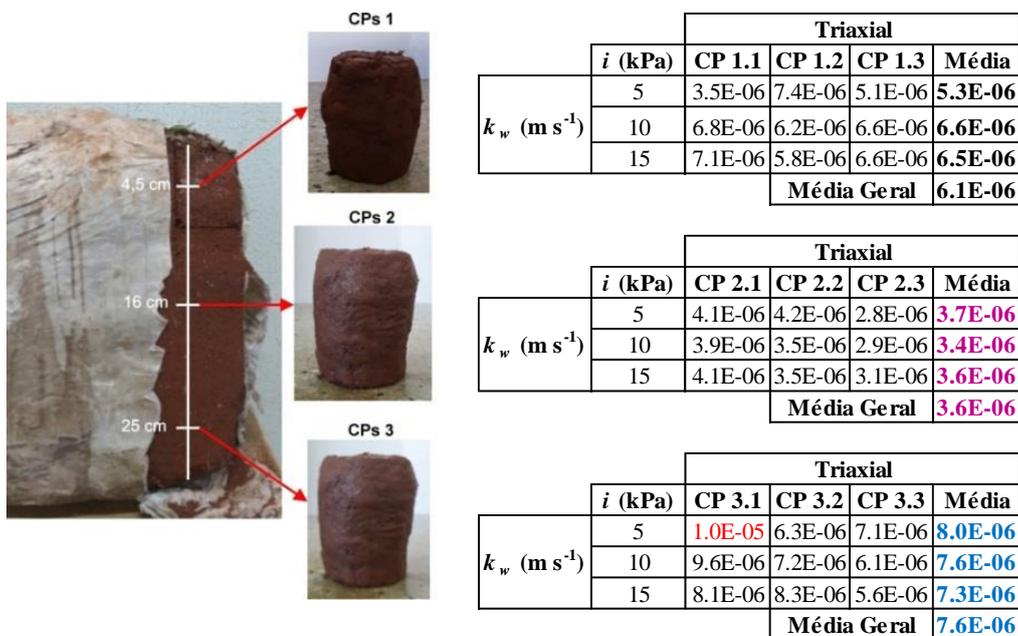


Figura 5.11. Condutividade hidráulica saturada dos CP indeformados com presença de raízes (espécie *Paspalum notatum* - grama batatais) para diferentes profundidades.

Analisando os resultados apresentados na Figura 5.10b, percebe-se que a condutividade hidráulica saturada do solo na condição reconstituída é regida pela macroestrutura, tendo condutividade hidráulica próxima a de solos arenosos, ou seja, $4,8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ em média.

Como já dito anteriormente sobre os CP de solo reconstituídos, também não houve influência significativa dos diferentes gradientes hidráulicos impostos na determinação da condutividade hidráulica saturada para os CP indeformados com raízes. Todavia, para os CP referentes ao topo e base da amostra (maior profundidade), apresentaram os maiores valores de condutividade

hidráulica saturada. Esse fato pode estar relacionado com a maior presença de raízes da vegetação para a primeira camada e microorganismos para as camadas mais profundas analisada (Figura 5.11). A presença das raízes resulta em aumento da condutividade hidráulica saturada devido à rede de drenagem por elas estabelecidas podendo estar associada também ao aumento do valor de entrada de ar do solo, na CCSA, não sendo investigada nesta pesquisa por meio de ensaios laboratoriais.

No geral, em média, as condutividades hidráulicas saturadas determinadas nos ensaios triaxiais para os CP com vegetação (Figura 5.11) foram quase que o dobro das apresentadas pelos CP sem vegetação ($4,8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$).

Após o término dos ensaios triaxiais, os CP indeformados com raízes foram desmontados com extremo cuidado para a retirada, determinação do diâmetro máximo e quantificação das raízes existentes. Como previsto, os CP denominados de CP1 ou do topo da amostra indeformada, foram os que apresentaram maiores diâmetros e quantidade de raízes, destacando a forma radicular presente (Figura 5.12).

Camada/Quantidade	.1	.2	.3	
Topo CP1.	Massa Raízes Úmidas (g)	4.1573	5.0510	5.0150
	Massa Raízes Secas Ar (g)	1.0782	1.6015	3.0276
	Maior Diâmetro Raiz (mm)	2.44	2.06	2.07
				
Meio CP2.	Massa Raízes Úmidas (g)	3.1210	1.2881	2.9139
	Massa Raízes Secas Ar (g)	0.6303	0.2280	0.9988
	Maior Diâmetro Raiz (mm)	2.74	1.59	1.42
				
Fundo CP3.	Massa Raízes Úmidas (g)	1.1705	0.7309	0.6706
	Massa Raízes Secas Ar (g)	0.2497	0.1171	0.0537
	Maior Diâmetro Raiz (mm)	1.10	1.22	1.23
				

Figura 5.12. Características das raízes da gramínea *Paspalum notatum* para os diferentes CP indeformados e profundidades.

Cerca de 60 a 80% da massa das raízes da gramínea é encontrada nos 5,0 cm superiores do solo (Tabela 5.4) e requer de três a quatro anos para se tornar completamente desenvolvida (Coppin & Richards, 2007). Os sistemas radiculares são altamente ramificados e fibrosos, formando um emaranhado de raízes finas, na maioria de curta duração, durando apenas um ano. Há um ciclo constante de renovação, mas a parte do sistema radicular que é ativo é bastante reduzida durante o período de inverno (clima seco e frio).

Tabela 5.4. Porcentagem de massa das raízes secas ao ar (*Paspalum notatum*) em relação à massa total dos CP indeformados.

	(% _{raiz})		
	CP 1.	CP 2.	CP 3.
.1	0.76	0.46	0.21
.2	1.13	0.16	0.09
.3	2.09	0.80	0.04

Os mesmos ensaios para determinação da condutividade hidráulica saturada foram realizados para CP retirados e moldados após os ensaios de chuva realizados no SC a partir das amostras reconstituídas com a vegetação *Paspalum notatum* (Figura 5.13), com intuito de comparar as possíveis diferenças de condutividade hidráulica saturada, quantidade e diâmetro das raízes com as amostras indeformadas (retiradas em campo). Diferentemente dos CP com raízes indeformados, que foram moldados em três profundidades (Figura 5.11), os CP obtidos a partir das amostras reconstituídas com raízes foram retirados da amostra em apenas duas profundidades (topo e fundo), conforme Figura 5.13.

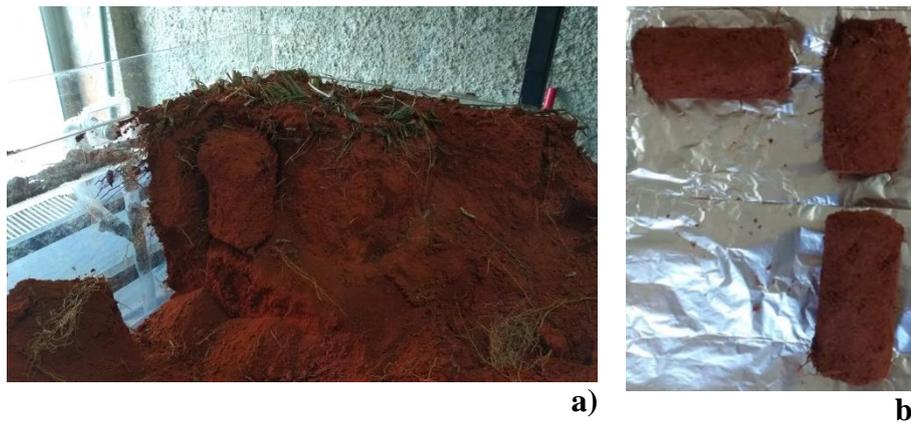


Figura 5.13. Preparação dos CP com solo reconstituído e vegetação *Paspalum notatum*; a) retirada dos CP b) moldagem dos CP.

Importante ressaltar que também foram retirados CP na condição horizontal, ou seja, direção de inclinação dos ensaios realizados no SC para verificar possível diferença entre a condutividade hidráulica saturada vertical e horizontal, isto é, anisotropia. Para a condição horizontal a condutividade hidráulica saturada foi de $1,4 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, ou seja, três vezes maior que a condutividade hidráulica saturada vertical.

Após o término dos ensaios de condutividade hidráulica saturada, novamente realizou-se o desmonte dos CP reconstituídos com a vegetação *Paspalum notatum* para avaliação das estruturas radiculares (Figura 5.14), notando-se diferenças cerca de quatro vezes menores nas massas, menores volumes e diâmetros, com destaque para maior número de raízes com diâmetros menores (finas) e bastante compridas (Tabela 5.5). Fato esse justificado pelo tempo (idade) de formação das raízes da vegetação, que para os CP reconstituídos foram de seis meses e para os indeformados (campo) era de cinco anos (conforme relato dos moradores onde a amostra de solo indeformado com vegetação foi retirada).

Camada/Quantidade	.1	.2	.3
Topo CP1.	Massa Raízes Úmidas (g) 1.730	Massa Raízes Úmidas (g) 1.900	Massa Raízes Úmidas (g) 1.130
	Massa Raízes Secas Ar (g) 0.230	Massa Raízes Secas Ar (g) 0.280	Massa Raízes Secas Ar (g) 0.210
	Maior Diâmetro Raiz (mm) 0.98	Maior Diâmetro Raiz (mm) 1.13	Maior Diâmetro Raiz (mm) 1.73
			
Fundo CP3.	Massa Raízes Úmidas (g) 0.490	Massa Raízes Úmidas (g) 0.1551	Massa Raízes Úmidas (g) 0.680
	Massa Raízes Secas Ar (g) 0.070	Massa Raízes Secas Ar (g) 0.0003	Massa Raízes Secas Ar (g) 0.080
	Maior Diâmetro Raiz (mm) 0.79	Maior Diâmetro Raiz (mm) 0.73	Maior Diâmetro Raiz (mm) 1.05
			

Figura 5.14. Características das raízes da gramínea *Paspalum notatum* para os diferentes CP reconstituídos e profundidades.

Tabela 5.5. Porcentagem de massa das raízes secas ao ar (*Paspalum notatum*) em relação à massa total dos CP reconstituídos com a presença da gramínea *Paspalum notatum*.

	(% raiz)	
	CP1.	CP3.
.1	0,17	0,06
.2	0,21	0,0002
.3	0,16	0,06

6. ENSAIOS EXPERIMENTAIS UTILIZANDO O SIMULADOR DE CHUVA

Este capítulo descreve como foram realizados os ensaios experimentais utilizando o simulador de chuvas (SC) desenvolvido, mostrando desde a metodologia de preparação das amostras de solo com e sem vegetação (do tipo gramínea), além de todas as etapas procedimentais e especificação de montagem dos ensaios. Ainda, apresenta e discute os resultados experimentais (monitorados ao longo do ensaio de precipitação no simulador de chuvas) com foco na retroalimentação da modelagem numérica.

6.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLO COMPACTADAS

Para a realização dos ensaios no SC as amostras de solo com e sem vegetação utilizadas foram do tipo reconstituídas e, inicialmente atenderam os critérios de umidade e índice de vazios conforme apresentado no Capítulo 5, ou seja, foram preparadas em função do estudo de compactação proposto por Araújo (2019), tendo umidade inicial de 18% e índice de vazios de 1,0.

Para que esses critérios fossem atendidos e lembrando que as dimensões da parcela amostral do SC é de 0,5 x 0,5 x 0,3 m, houve a necessidade de utilizar prensa hidráulica de grande porte para acomodação e preparação das amostras com aplicação de elevadas cargas de compactação (aproximadamente, quatro toneladas em média). Assim, após grande procura pelo equipamento capaz de comportar a dimensão e proporcionar qualidade de produção das amostras com as especificidades técnicas requeridas, utilizou-se prensa hidráulica do laboratório de estruturas da Universidade Federal de Goiás – UFG (Figuras 6.1 e 6.2).

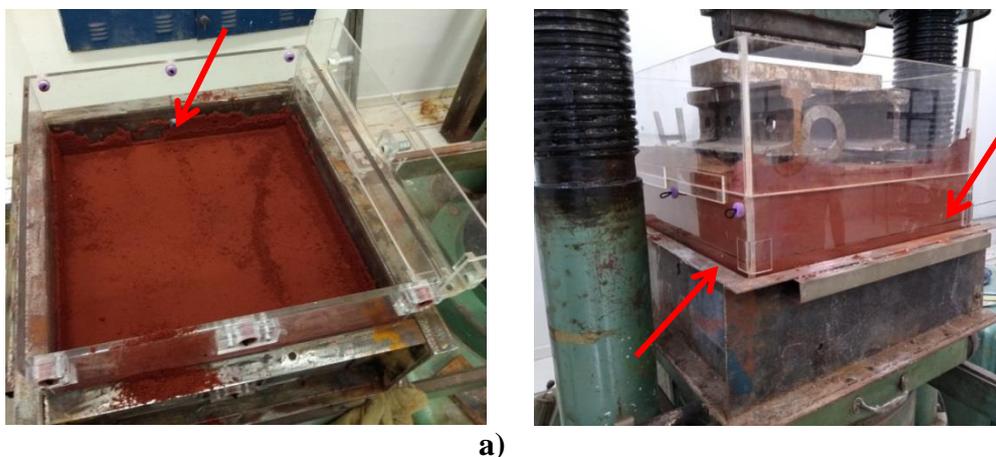


Figura 6.1. Compactação do solo para confecção das amostras para ensaios no SC a partir da altura das camadas a) primeira camada compactada; b) marcação das alturas das camadas e utilização de colarinho.

Assim, a altura e a quantidade de camadas foram determinadas a partir do entendimento físico de menor mobilização de atrito lateral gerado no processo de compactação, admitindo que a área em planta da amostra fosse igual à área lateral, conforme:

$$A_L = A_B \rightarrow 4,0,5.H = 0,5.0,5 \rightarrow H = 12,5\text{cm} \quad (6.1)$$

em que A_L e A_B são respectivamente a área lateral e a área em planta da amostra do SC [L^2] e H é a altura da camada [L].

Dessa forma, adotou-se a altura de 10 cm de camada de solo para preparação das amostras compactadas, totalizando três camadas, tanto para as amostras de solo exposto quanto para as amostras com cobertura vegetativa, sendo que a Equação 6.1 demonstrou altura requerida máxima de 12,5 cm. Duas outras importantes observações quanto à altura da camada adotada (10 cm) se refere à não coincidência das alturas das camadas com a posição de instalação dos sensores de umidade e tensiômetros na caixa acrílica e magnitude da carga de compactação necessária para cada camada, que se fosse adotada maior altura da camada, maior carga seria exigida.

Determinada a altura de cada camada de solo a ser compactada e tendo em mãos os parâmetros físicos do solo (G_s , e_o , w e n) já determinados e apresentados no Capítulo 5, foi possível determinar a massa total de solo requerida na compactação para cada camada de 10 cm (Anexos G1 e G2), aproximadamente 39,92 kg, sendo a compactação estática controlada em função deste parâmetro, com aplicação de velocidade lenta (cerca de 5 mm min⁻¹). Como a amostra é acondicionada e compactada em caixa acrílica, foi possível marcar as alturas das camadas em todo o seu perímetro interno e externo para monitoramento (Figura 6.1b).

Destaca-se que foi necessário desenvolver uma caixa metálica (Figura 6.1) para acondicionar a caixa acrílica durante o processo de compactação, pois a massa total de solo (aproximadamente 120,0 kg) e a elevada carga requerida (aproximadamente 4.200 kg por camada), a danificaria. Na Figura 6.1a é possível perceber a altura do solo que foi compactado na caixa acrílica (cerca de 6 cm) para a camada do fundo, sendo necessária a utilização de colarinho para a compactação da última camada, ou seja, a camada superficial ou do topo (Figura 6.1b)

Todas as amostras de solo a serem ensaiadas no SC, com e sem vegetação, foram preparadas e compactadas com os mesmos parâmetros e condições iniciais de umidade e índice de vazios, perfazendo as mesmas etapas metodológicas de compactação (Figura 6.2). Faz-se necessário

destacar que isso foi feito com exceção a) do tipo de material utilizado no acondicionamento das amostra, sendo acrílico para o solo exposto e madeirite para o solo com vegetação; b) da realização da última etapa, referente ao plantio e irrigação da vegetação (Figura 6.2e) que não foram realizados para as amostras com solo exposto.



Figura 6.2. Etapas de preparação e compactação estática das amostras de solo com e sem vegetação a) secagem ao ar até umidade hidrocópica de 5%; b) peneiramento (#2,0), quarteamento e homogeneização do solo para umidade de 18% (de 10 em 10 kg); c) compactação estática de amostras para solo exposto, caixa acrílica e acessórios; d) compactação estática de amostras para solo com vegetação, caixa em madeirite; e) plantio das espécies de gramíneas utilizadas e f) amostras prontas para ensaio no simulador de chuva.

Dessa forma, no geral, as etapas de preparação e compactação estática das amostras de solo com e sem vegetação seguiram as sequências de (Figura 6.2):

1) secagem do solo ao ar (material deformado) até umidade higroscópica, aproximadamente de 2 a 5% (Figura 6.2a). O solo natural coletado estava com umidade natural média de 17%, próximo da umidade de trabalho, ou seja, 18%. Algumas vezes, devido ao tempo chuvoso, foi necessária a secagem com auxílio de ventilação forçada (ventiladores);

2) destorroamento e peneiramento do solo na peneira #10, não necessariamente atendendo a essa ordem. Após realização destes serviços, o solo foi acondicionamento em local hermético (tambores) para posterior verificação de umidade inicial (Figura 6.2b);

3) adição de água ao solo para alcance da umidade de trabalho (18%) e homogeneização. Esta etapa foi realizada com muito cuidado no que tange à quantidade de água em massa acrescentada para cada 10 kg de solo. Essa quantidade de solo foi estipulada no intuito de se ter maior controle da umidade para preparação da amostra, pois preparar 120 kg de solo na umidade desejada de forma única seria quase que impossível.

Assim, a quantidade de água necessária para atingir a umidade ótima (18,0%) foi determinada em balança de precisão (0,1 grama), sendo adicionada ao solo para homogeneização de forma a desfazer as agregações provenientes do adicionamento da água para, posteriormente, serem armazenadas em sacos plásticos, caixas de isopor e panos úmidos (cura úmida por 24 h);

4) verificação da umidade final em estufa a 105°C a partir de três amostras de solo (cápsulas) retiradas dos sacos plásticos de armazenamento relatado no processo anterior, admitindo-se variação de $\pm 1,0\%$. Tomou-se o cuidado de calcular os índices físicos considerando a umidade final média atingida nesta fase para a compactação desejada ($e = 1,0$).

A Tabela 6.1 exemplifica como foi o controle da umidade final das parcelas de solo contida em cada saco plástico de 10 kg para uma das amostras ensaiadas e, caso atingissem a umidade final esperada mas não fossem de imediato compactadas, estas eram acondicionadas conforme descrito anteriormente e realizada nova verificação ao passar de três dias ou mais.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6.1, percebe-se pequenas variações existentes entre as umidades de cada camada das parcelas de solo (baixo desvio padrão), indicando que o controle e o processo de umidificação da amostra total foi satisfatório. Todos os outros dados de umidade para todas as amostras ensaiadas no SC com e sem vegetação podem ser consultados nos Anexos G1 a G3;

Tabela 6.1. Controle do teor de umidade do solo para preparação da amostra sem vegetação a ser ensaiada no SC (parcelas de 10 kg) – 1º Ensaio.

Camada	Sacos Plásticos	w (%)	Massa (kg)	Camada	Sacos Plásticos	w (%)	Massa (kg)	Camada	Sacos Plásticos	w (%)	Massa (kg)
	1-E	17.9	11.22		2-C	17.6	11.26		1-C	18.4	11.22
	2-E	17.3	11.16		3-C	18.2	11.4		8-C	19	11.34
	3-B	18.7	11.24		6-A	17.5	12.98		09-C	17.9	11.04
Topo	3-E	17.6	6.3	Meio	3-E	17.6	4.28	Fundo	4-C	18.5	6.32
	Média	17.88	39.92		Média	17.73	39.92		Média	18.45	39.92
	* σ	0.60			* σ	0.32			* σ	0.45	
	**CV	3.37			**CV	1.81			**CV	2.44	

*desvio padrão; **coeficiente de variação.

5) realização e conferência da quantidade em massa de solo úmido necessário para compactação de 10 cm de camada, atendendo o limite estabelecido para o índice de vazios de 1,0. Foi acrescentado de 2,0 a 3,0% a mais de solo, pois no processo de compactação sempre ocorrem pequenas perdas. Geralmente o solo natural pode ocupar de 1,6 a 2,0 vezes a altura da camada, fazendo-se necessário desenvolver um colarinho de mesma altura da caixa acrílica para compactação da última camada;

6) espalhamento de forma homogênea do solo preparado na caixa acrílica ou de madeirite (Figura 6.3a) evitando excesso de concentrações locais seguindo com o processo de compactação lenta (Figuras 6.2c e 6.2d). Detalhe importante adotado é que, ao término da compactação de uma camada, o solo compactado era escarificado superficialmente com vassoura metálica antes de ser compactada a próxima camada (Figura 6.3b), para auxiliar na aderência, homogeneidade e evitar potencial superfície de ruptura da amostra. Destaca-se que a escarificação ocorreu no sentido da largura da amostra para evitar caminhos preferenciais do fluxo de água entre as camadas;

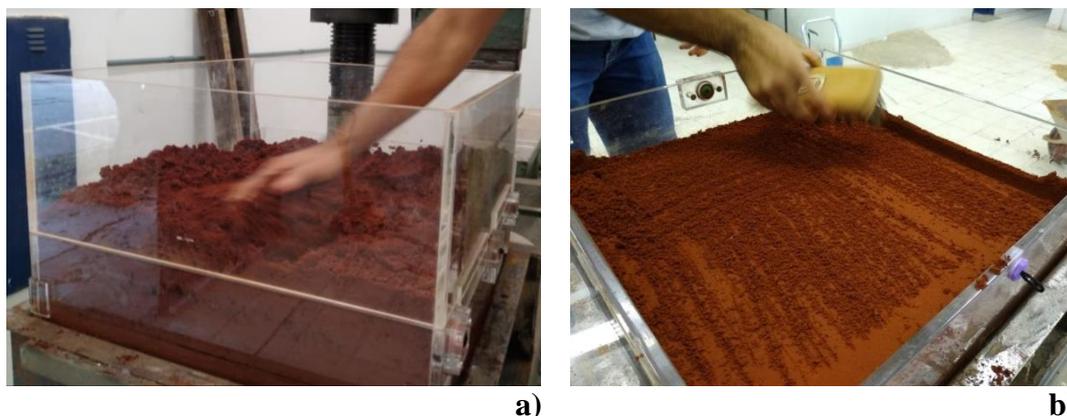


Figura 6.3. Detalhes no procedimento de compactação das camadas das amostras de solo a serem ensaiadas no SC: a) homogeneização; b) escarificação.

7) isolamento e proteção da amostra com plástico filme apropriado e papel alumínio contra perda de umidade e transporte até o SC (Figura 6.4), no caso de amostras compactadas sem

vegetação. No caso de amostras com vegetação, estas eram encaminhadas para área aberta (em campo) com iluminação e ventilação natural para o plantio da espécie gramínea de estudo. As amostras com vegetação eram irrigadas diariamente sem excesso e sua evolução acompanhada para depois de três a quatro meses serem ensaiadas no SC (Figuras 6.2e e 6.2f).

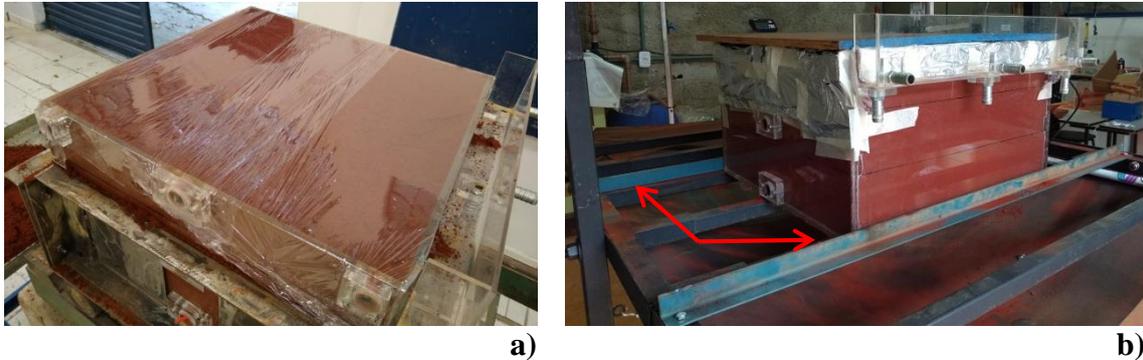


Figura 6.4. Detalhes da proteção e instalação das amostras de solo a serem ensaiadas no SC: a) após compactação; b) já fixada no módulo aparato pronta para instalação dos sensores.

6.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLO COM VEGETAÇÃO

Todos as etapas metodológicas de preparação das amostras de solo compactado (remoldadas) foram descrita no item anterior. Porém, diferentemente das amostras de solo compactado sem vegetação, que apenas requeriam que fossem transportadas para o SC para ensaios, as amostras com cobertura vegetativa do tipo gramínea utilizada (grama batatais, *Paspalum notatum*) precisam de preparação prévia adequada em campo para serem ensaiadas no SC, como pode-se verificar na Figura 6.5, com destaque principal para a não danificação da amostra experimental ao longo do preparo, cobertura vegetativa bem desenvolvida (cerca de 30 cm de altura em média), aspecto bem nutrido e sistema radicular bem desenvolvido das raízes.

Ressalta-se a grande dificuldade de preparo em campo e do transporte da amostra com vegetação para o local de ensaio (simulador de chuva), pois esta última etapa requeria um pequeno guindaste hidráulico, ainda não tão apropriado para a atividade, e quatro pessoas para a colocação e retirada do guindaste ao SC, tomando muito cuidado para não ocorrerem vibrações e choques com grandes intensidades.

Destaca-se, ainda, que todo o processo de preparação da amostra de solo com vegetação em campo foi muito bem sucedido, com exceção de apenas um possível ponto desfavorável, ou seja, a condição de contorno proporcionada para o sistema de contato solo-acrílico não foi totalmente adequada (Figura 6.5e), de modo que poderia haver preferência de fluxo de água diante da realização dos ensaios no SC.

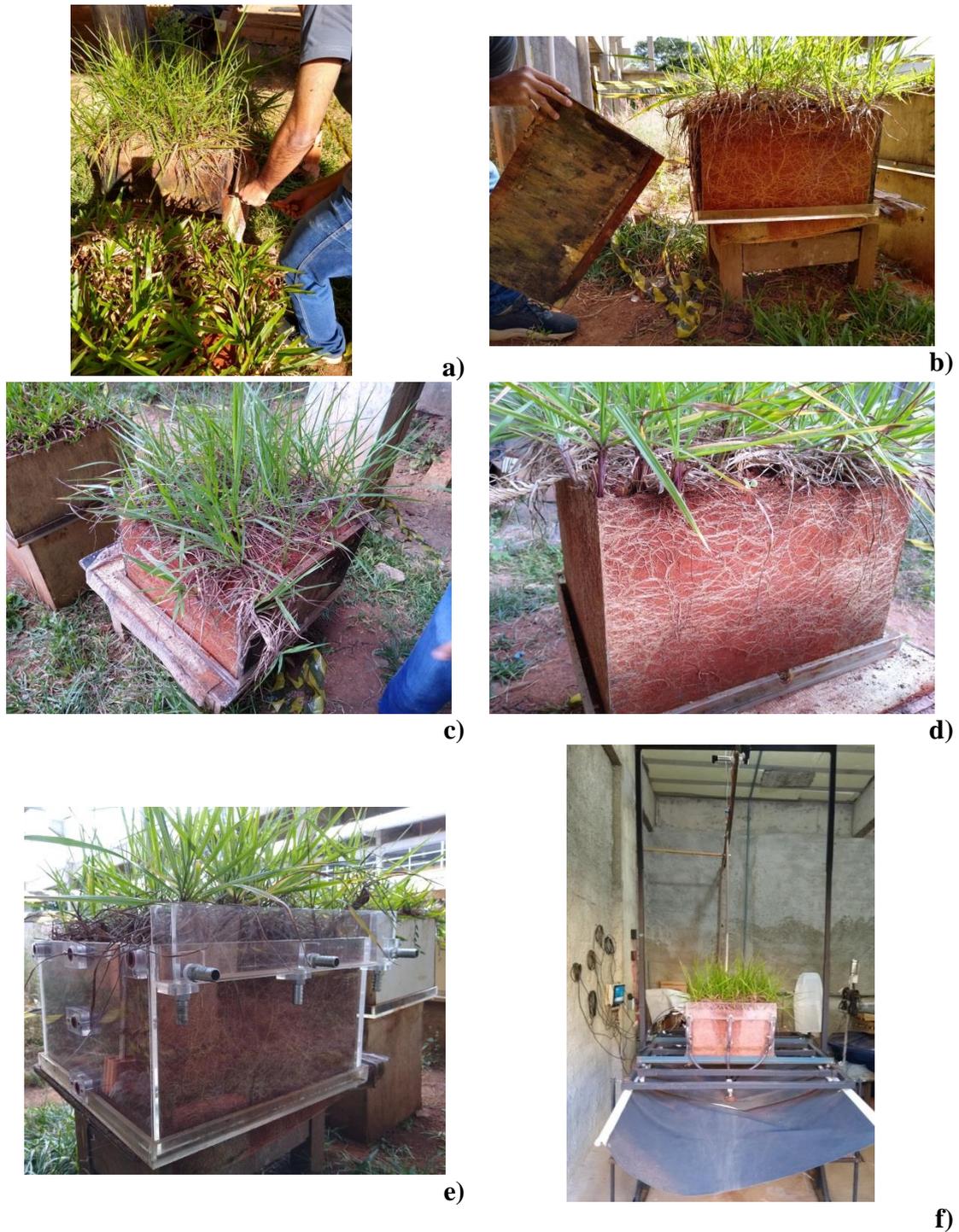


Figura 6.5. Etapas de preparação prévia da amostra de solo compactado com vegetação *Paspalum notatum* (grama batatais) para posteriores ensaios no SC: a) desmontagem do caixote de madeirite provisório; b) retirada das laterais do caixote de madeirite; c) aspecto e interface base de acrílico-solo sem danificações; d) vista do sistema radicular após retirada do caixote madeirite; e) encaixe completo do recipiente acrílico (lateral) na base acrílica e f) amostra pronta para ensaio no SC já com sensores instalados.

Outro ponto importante para esse tipo de amostras é no que diz respeito à instalação dos sensores utilizados (umidade e tensiômetros), sendo necessária a utilização de ferramentas adequadas para o corte das raízes e posterior introdução deles.

6.3 PROCEDIMENTOS PREPARATÓRIOS

Preparadas as amostras de solo para serem ensaiadas no SC, alguns requisitos e procedimentos metodológicos iniciais para realização dos ensaios de chuva-vazão são necessários, tendo eles relação com a operação do SC ou com a instalação dos sensores utilizados (umidades, sucções ou vazões).

6.3.1 Operação do módulo aparato

Conforme já descrito no Capítulo 4, o SC é composto por três módulos, sendo eles: aparato, geração de chuva e monitoramento.

Para a operação do módulo aparato, partindo da premissa que o SC já está montado e localizado em ambiente laboratorial, mesmo não sendo regra, é necessário que antes de acondicionar a amostra neste módulo do SC, ele já contenha previamente as marcações e as indicações das corretas posições para cada inclinação de ensaio.

Tais marcações e indicações são necessárias para que a posição do bico aspersor que simulará a chuva fique centralizada e alinhada com o centro da amostra, mesmo que esteja na posição inclinada para qualquer ângulo, ou seja, cada inclinação requer uma posição de alocação no aparato metálico do SC. Para realização dessa etapa utilizaram-se equipamentos como prumo de centro e níveis do tipo bolha.

Após instalada a amostra no devido local no SC, ela foi travada à mesa de inclinação, seguindo com a etapa de instalação dos sensores de umidade e tensiômetros (Figura 6.4b).

6.3.2 Instalação dos sensores (operação do módulo monitoramento)

A instalação dos sensores de umidade e tensiômetros requereu cuidados extras, pois o nível de compactação do solo para as amostras não permitiu que fossem instalados de forma manual sem auxílio de ferramentas acessórias. Essa situação já tinha sido anteriormente vivida na etapa de calibração dos sensores de umidade, ou seja, houve a necessidade de desenvolver e utilizar ferramenta acessória do tipo garfo e trado para a instalação dos sensores de umidade e tensiômetros, respectivamente (Figura 6.6).

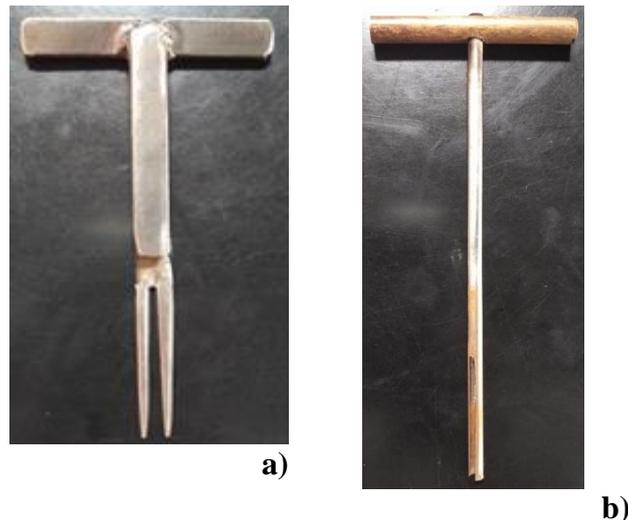


Figura 6.6. Ferramentas acessórias utilizadas na instalação dos sensores de umidade e tensiômetros, respectivamente: a) garfo; b) trado.

O acessório do tipo garfo (Figura 6.6a) foi desenvolvido pelo próprio autor da pesquisa e permite abrir caminho de cravação para a instalação final dos sensores de umidade, tendo suas dimensões um pouco menores que as dos sensores propriamente ditos, para que fossem instalados de forma justa e firme na amostra de solo, sem perca de contato e sem perigo de serem danificados (Figura 6.6a).

Já o trado utilizado na instalação dos tensiômetros (Figura 6.6b) faz parte do kit adquirido para saturação dos mesmos e, também, possui dimensões um pouco menores que os tensiômetros em questão para atender a mesma finalidade citada anteriormente. Ressalta-se aqui outra importante medida adotada em sua instalação como a sua introdução de forma alinhada, sem excesso de força, solavancos ou movimentos bruscos contra a amostra de solo evitando a quebra da rosca da haste com o corpo do tensiômetro. Para minimizar esses efeitos indesejáveis, foi desenvolvido também, pelo autor da pesquisa, conexão auxiliar para instalação dos tensiômetros, descrito e apresentado no Item 4.3.1.

Após finalizada as instalações de todos os sensores, procedeu-se com a comunicação e a programação dos *data loggers* utilizados, um para cada conjunto de tipo de sensor. Maiores detalhes já foram apresentados nos Itens 4.2.2.3 e 4.3.2.

6.3.3 Operação do módulo geração de chuva - SC

Finalmente, após a alocação da amostra de solo, a instalação de todos os sensores, comunicação e programação dos *data loggers*, de fato pode-se simular os eventos de chuva-vazão, ainda sendo necessário realizar primeiramente os seguintes procedimentos:

1) retirada de ar da rede hidráulica: esta etapa é realizada após a ligação do inversor de frequência, partida na bomba centrífuga, ligação da tomada da válvula solenóide e PID, atendendo rigorosamente esta sequência. Esta fase é de suma importância, pois evita erros de ajuste automático da pressão de serviço na malha hidráulica, sendo realizada com o auxílio de um funil para captar a vazão de saída do aspersor sem deixar aplicar a chuva simulada na amostra ainda. Acessando o *software* via *bluetooth* para *Android*, aplicam-se cinco picos ou mais (liga e desliga) em pressões mais altas (cerca de 150 kPa) até a retirada total do ar;

2) ajuste de pressão de serviço de 70 kPa, tempo total, abertura e fechamento da válvula solenóide do aspersor (chuvas constantes ou pulsadas) via *software bluetooth* para *Android* e retirada do funil utilizado na etapa anterior. A pressão de serviço também foi aferida no manômetro analógico seco instalado no mesmo ponto do sensor de pressão da rede hidráulica para certificação;

3) preparação de recipientes (baldes), sensor de fluxo e balança para monitoramento da massa de água e vazão que escoam superficialmente pela amostra em intervalos pré-definidos de cinco minutos;

4) ajuste da mesa de inclinação a partir de travas de segurança para o ângulo de ensaio desejado;

5) ativação do início da realização do ensaio chuva-vazão por meio do mesmo sistema *bluetooth* para *Android*, já citado.

Ressalta-se que, durante a simulação das precipitações no SC, os sedimentos que eram carregados da amostra para a calha coletora do recipiente acrílico podiam ficar ali sedimentados, sendo necessário movimentá-los manualmente para serem escoados para os recipientes (baldes) nos intervalos pré-determinados, sendo esta etapa do ensaio sugestão para pesquisas futuras.

Os sedimentos carregados pela ação dos eventos chuvosos (energia cinética de impacto das gotas de chuva e escoamento superficial), captados nos baldes a cada 5 min, foram deixados em repouso por 24 h e, por sedimentação (Figura 6.7a), separados da água e levados a estufa para determinação da massa específica seca (Figura 6.7b).

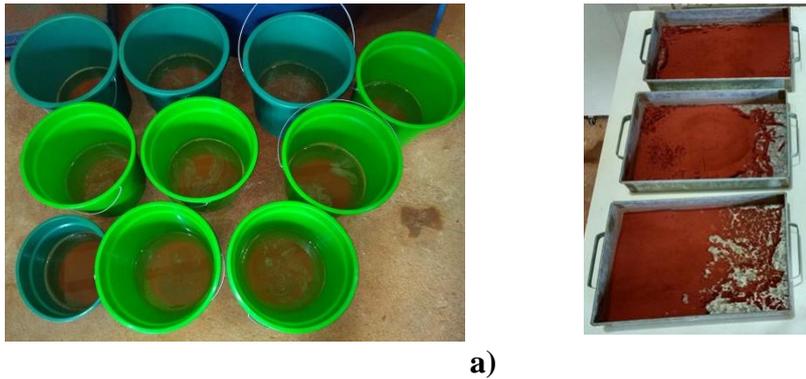


Figura 6.7. Determinação da quantidade de sólidos erodidos e carregados após ensaio no SC: a) em decantação para retirada da água; b) após 24 h na estufa para determinação da massa específica.

Outro ponto importante a destacar é que todas as considerações relativas às parcelas de chuva simuladas perdidas (que cai fora da amostra e dentro da calha) foram avaliadas (Capítulo 4) e descontadas no balanço hídrico final.

6.4 MONITORAMENTO, AQUISIÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

O monitoramento das variações temporais e espaciais ocorridas no volume de água dentro da amostra de solo ensaiada e escoamento superficial do solo com ou sem cobertura vegetativa foi realizado por meio de sensores de umidade, tensiômetros e balanças, respectivamente.

Esses dados foram coletados e armazenados por meio dos *data loggers* em intervalos de tempos representativos e subsidiaram a interpretação, quantificação e calibração dos fenômenos envolvidos considerando a retroalimentação do modelo numérico.

Assim, as estatísticas de avaliação de modelos recomendadas foram selecionadas com base nos seguintes fatores: a) robustez em termos de aplicabilidade a vários constituintes, modelos e condições; b) conformidade com as recomendações das publicações acadêmicas existentes, sendo: comumente usado, aceito e recomendado; e c) pontos fortes identificados na avaliação do modelo.

Dessa forma, vários índices de erro são comumente usados na avaliação de modelos. Isso inclui erro relativo médio ou absoluto (MAPE), erro quadrado médio (MSE) e raiz do erro quadrado médio (RMSE), sendo este último o índice de erro mais comumente utilizado em aferição da qualidade de ajuste de modelos (Moriassi *et al.*, 2007). Esses índices são valiosos porque indicam erro nas unidades (ou unidades ao quadrado) da grandeza de interesse, o que auxilia na análise dos resultados (Legates & McCabe, 1999). Os valores RMSE, MAPE e MSE de 0 indicam ajuste perfeito. Singh *et al.* (2004) afirmam que valores RMSE e MRE inferiores à

metade do desvio padrão dos dados medidos podem ser considerados baixos e que são apropriados para a avaliação de modelo, sendo estes determinados nesta pesquisa.

Então, os resultados das análises foram avaliados pelos erros relativos médios entre o que foi registrado no modelo físico e aqueles estimados pela modelagem numérica e pela raiz do erro médio quadrático da diferença entre a predição e o valor real, para qualquer grandeza, conforme as equações a seguir:

$$\xi_r = MAPE = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} \left| \frac{M_F - M_N}{M_F} \right|}{n_a} \quad (6.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_a} (M_F - M_N)^2}{n_a}} \quad (6.3)$$

em que ξ_r ou RME representa o erro relativo ou absoluto entre as grandezas avaliadas, RMSE a raiz do erro quadrático médio, M_F é a grandeza física registrada no monitoramento, M_N é a grandeza física estimada numericamente e n_a é o número de amostras ou pontos.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados sete ensaios no SC, sendo quatro ensaios apenas para o solo exposto e três para o solo vegetado com gramínea (*Paspalum notatum*), conhecida também como grama batatais ou mato grosso. Desse total, apenas os resultados de três ensaios principais (1° e 3° Ensaios sem vegetação e 1° Ensaio com vegetação) são apresentados e discutidos nesta pesquisa. Isso se deve ao fato de que as amostras foram reconstituídas com características muito próximas de campo, seja do ponto de vista do controle do teor de umidade, seja do índice de vazios, do grau de saturação, das poropressões e das sucções.

Acerca dos outros ensaios realizados (2° e 4° Ensaios sem vegetação e 2° e 3° com vegetação), seus resultados não foram apresentados e discutidos porque utilizaram-se de amostras reaproveitadas destes três principais ensaios realizados anteriormente, havendo necessidade de complementar o solo erodido, além de apresentar-se em condições iniciais de umidade, grau de saturação e poropressões muito próximas à saturação.

A dificuldade, o tempo demandado na preparação das amostras e realização dos ensaios no modelo físico sem vegetação (aproximadamente um mês) e com vegetação (aproximadamente 6 meses) e a calibração do modelo numérico a partir dos testes físicos realizados no SC (cerca de 70 e 140 h em média para cada cenário simulado sem vegetação e com vegetação, respectivamente), aliados aos bons resultados encontrados, justifica e satisfaz o objetivo principal qualitativo e metodológico da pesquisa. As condições iniciais medidas no experimento físico e utilizadas na simulação numérica dos sete ensaios realizados no SC podem ser visualizadas na Tabela 7.1.

Ressalta-se ainda que, para os Ensaios 1 e 2 sem vegetação, foi monitorado apenas o Ponto 4 do modelo experimental no que diz respeito às poropressões, ou seja, ponto situado no meio da amostra tanto no sentido do comprimento quanto espessura, pois no momento dispunha-se apenas de um equipamento de leitura do tipo *Infield* (apenas uma saída para tensiômetro). O conteúdo volumétrico de água foi monitorado em todos os cinco pontos amostrais para todos os ensaios realizados no SC.

Para os outros ensaios com e sem vegetação, foi adquirido *data logger e controller* do tipo GP2, da Delta-T Devices, com possibilidade de monitoramento de até seis tensiômetros do tipo T5-10 da UMS, utilizado para o monitoramento e o armazenamento dos dados de poropressões dos 5 pontos da amostra experimental (recipiente acrílico).

Tabela 7.1. Parâmetros iniciais medidos e monitorados em cada ensaio realizado no SC.

	Ensaio	Sensor	P_p (mm h ⁻¹)	α_D	w_i (%)	u_{wi} (kPa)	ψ_{wi} (kPa)	θ_{wi} (m ³ m ⁻³)	$\theta_{wi, sensor}$ (m ³ m ⁻³)	
Sem vegetação $G_s = 2.69$ $n = 0.5$ $e_o = 1.01$	1	4	220	15°	18.03	-20.9	20.9	0.241	0.101	
	2	4	220	15°	35.98	-2.4	2.4	0.480	0.230	
	1	1					-25.9	25.9		0.196
		2					-24.0	24.0		0.215
	3	3	86	15°	17.99	-26.3	26.3	0.241		0.196
		4					-20.6	20.6		0.176
	5	1					-18.2	18.2		0.225
		2					-3.3	3.3		0.292
	4	2					-3.0	3.0		0.335
		3	86	15°	28.37	-2.4	2.4	0.380		0.320
4						-1.9	1.9		0.280	
Com vegetação $G_s = 2.69$ $n = 0.5$ $e_o = 1.01$	1	1			15.4	-79.6	79.6		0.026	
		2			15.9	-66.9	66.9		0.062	
	3	3	86	15°	14.3	-72.2	72.2	0.186		0.098
		4			14.2	-53.1	53.1			0.101
		5			12.2	-83.4	83.4			0.084
	2	1					-8.5	8.5		0.176
		2					-8.6	8.6		0.233
		3	86	15°	22.65	-8.4	8.4	0.303		0.245
	4	4					-7.1	7.1		0.236
		5					-6.0	6.0		0.277
3	1					-5.8	5.8		0.194	
	2					-6.0	6.0		0.253	
	3	220	15°	26.35	-6.0	6.0	0.353		0.273	
	4					-4.6	4.6		0.267	
	5					-3.4	3.4		0.321	

De modo geral, percebe-se o bom controle da umidade e compactação do solo na preparação das amostras sem vegetação (Ensaio 1 e 3), considerando teor de umidade inicial proposto de 18,0%. As poropressões também apresentaram valores muito próximos (-20,9 kPa para Ensaio 1 e -20.6 kPa para Ensaio 3) para o Ponto 4 da amostra (Tabela 7.1). Ainda com relação às poropressões iniciais, conseqüentemente, as sucções para a amostra sem vegetação (Ensaio 3), em especial, dos pontos superficiais monitorados (Pontos 1, 2 e 3), verifica-se homogeneidade, com maior sucção matricial na superfície e menores sucções matriciais ao longo da espessura (camadas de 15 e 30 cm).

No que diz respeito ao monitoramento das poropressões iniciais para a amostra com vegetação (Ensaio 1), percebe-se menor valor na camada mais profunda (30 cm), aumentando sua grandeza para a camada intermediária (15 cm) e voltando a diminuir para a camada superficial (onde está a cobertura vegetativa e raízes), ou seja, a maior quantidade de água presente nos poros do solo com vegetação está na camada central da amostra. No geral, as poropressões monitoradas na camada superficial apresentaram-se próximas (cerca de -72 kPa) indicando homogeneidade proporcionada pela vegetação (Tabela 7.1).

Importante ressaltar que os Ensaio 2 e 4 sem vegetação e os Ensaio 2 e 3 com vegetação foram realizados reaproveitando as Amostras 1 e 3 sem vegetação e 1 com vegetação, respectivamente, agora com as modificações decorrentes da realização dos ensaios anteriores no que diz respeito à aplicação da chuva. Todos os outros parâmetros iniciais de ensaio, como inclinação, intensidade e tempo de chuva, foram mantidos.

7.1 ENSAIOS EXPERIMENTAIS COM E SEM COBERTURA VEGETATIVA UTILIZANDO O SIMULADOR DE CHUVA

As Figuras 7.1 a 7.3 ilustram as etapas principais dos ensaios de chuva realizados no SC para as amostras sem e com vegetação, respectivamente, com maior ênfase para a camada superficial das amostras ensaiadas. Percebe-se, pelas Figuras 7.1 e 7.2, que houve o desenvolvimento de processo erosivo e, conseqüentemente, carregamento de partículas do solo ao longo do ensaio, o que pode estar relacionado com uma maior energia cinética das gotas de chuvas simuladas em relação às chuvas naturais (Figuras 7.1f e 7.2f), tema já apresentado e discutido no Item 4.3.3.

Entretanto, esses processos não se desenvolveram para a amostra de solo com vegetação (Figura 7.3), evidenciando sua importância nos processos de infiltração, percolação, controle de erosões e carregamento de sólidos, além da diminuição do escoamento superficial total.

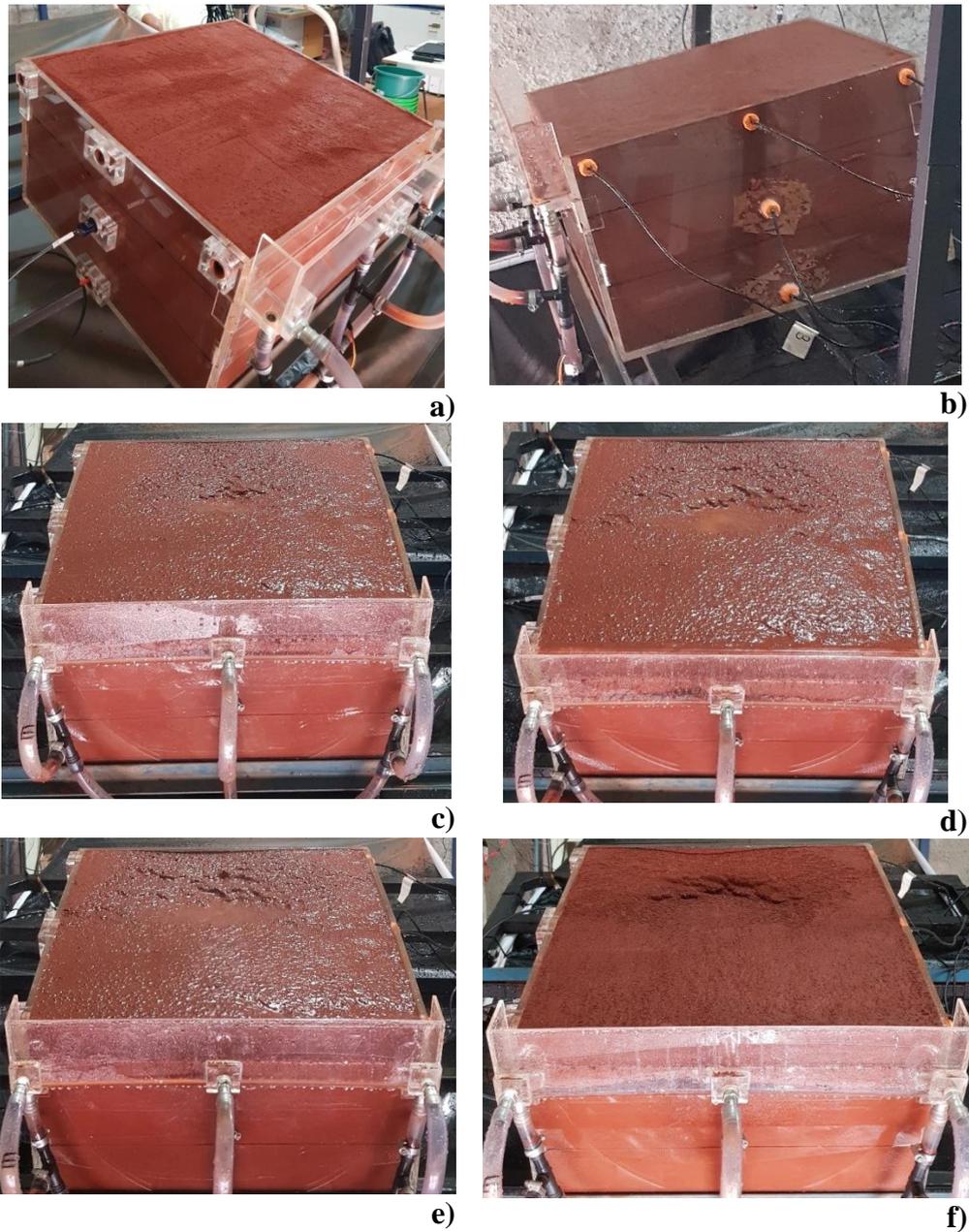


Figura 7.1. Etapas e detalhes do monitoramento do ensaio realizado no SC para solo sem vegetação (superfície da amostra), 1º Ensaio considerando $P_p = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$ e $\alpha_D = 15^\circ$: a) monitoramento das poropressões no Ponto 4 (*infield*), antes do ensaio; b) monitoramento do conteúdo volumétrico de água, antes do ensaio; c) após 10 min; d) após 30 min; e) após 45 min e f) fim do ensaio, após 60 min.

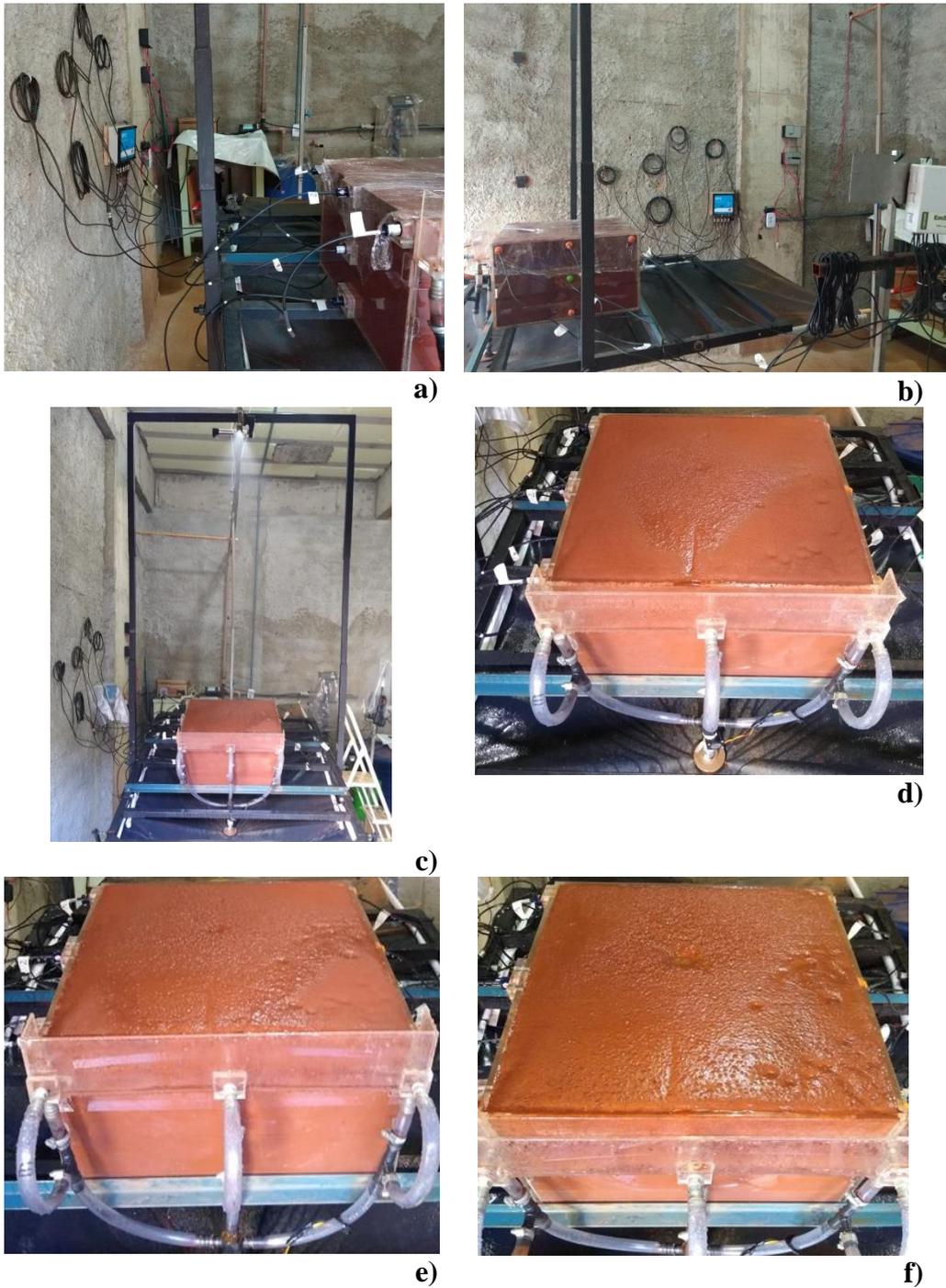


Figura 7.2. Etapas e detalhes do monitoramento do ensaio realizado no SC para solo sem vegetação (superfície da amostra), 3º Ensaio considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$ e $\alpha_D = 15^\circ$: a) monitoramento das poropressões em todos os pontos da amostra (*data logger*), antes do ensaio; b) monitoramento do conteúdo volumétrico de água, antes do ensaio; c) visão geral do SC antes do ensaio; d) após 10 min; e) após 30 min e f) fim do ensaio, após 60 min.

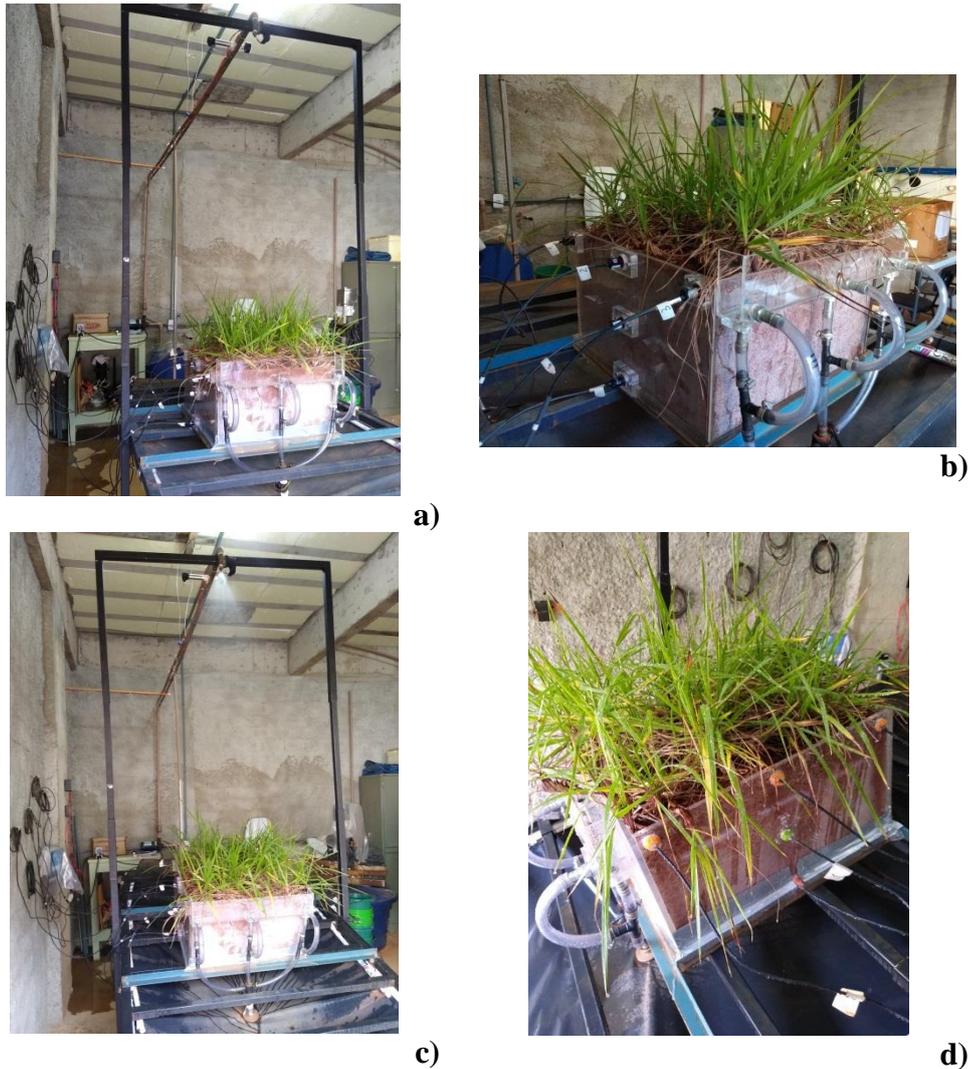


Figura 7.3. Etapas e detalhes do monitoramento do ensaio realizado no SC para solo com vegetação, 1º Ensaio considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$ e $\alpha_D = 15^\circ$: a) amostra preparada para início do ensaio; b) detalhamento dos tensiômetros instalados para monitoramento das poropressões em todos os pontos da amostra (*data logger* a esquerda); c) realização do ensaio no SC (aplicação da chuva simulada) e d) monitoramento do conteúdo volumétrico de água com detalhe de preparação do recipiente acrílico (interface fundo-lateral), momento do ensaio no SC.

A evolução do conteúdo volumétrico de água, detectado pelos sensores de umidade, $\theta_{wi,sensor}$, já considerando os efeitos da calibração dos mesmos, grau de saturação, teor de umidade e poropressões no momento do ensaio de chuva realizado no SC para o 1º Ensaio sem cobertura vegetativa são apresentados nas Figuras 7.4 a 7.7, respectivamente. Tanto o teor de umidade quanto o grau de saturação apresentados nas Figuras 7.5 e 7.6 foram calculados a partir do conteúdo volumétrico de água detectado pelos sensores de umidade, $\theta_{wi,sensor}$, já considerando a calibração dos mesmos e parâmetros físicos do solo.

Vale relembrar que, para esse ensaio, as poropressões foram monitoradas apenas no ponto central da amostra, ou seja, Ponto 4 (Figura 7.7).

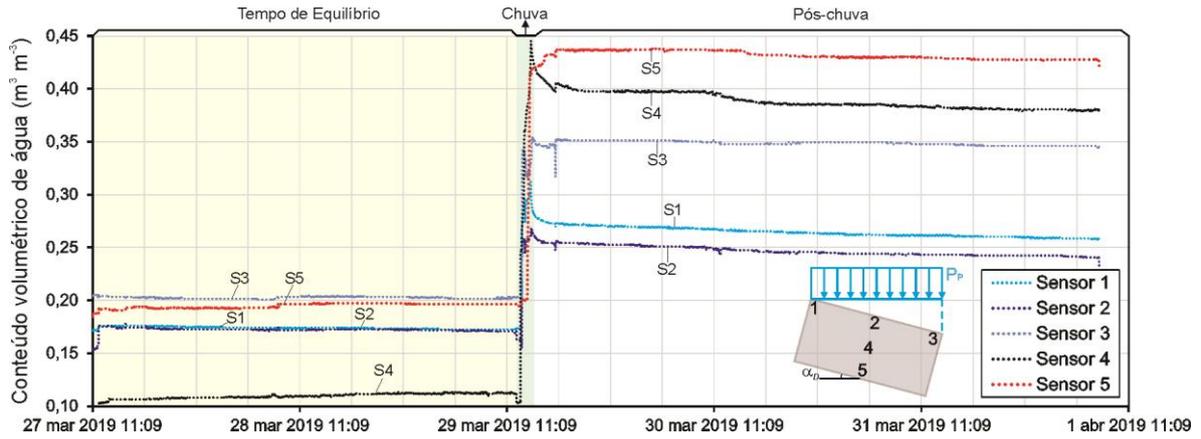


Figura 7.4. Evolução do conteúdo volumétrico de água detectado pelos sensores de umidade ($\theta_{wi,sensor}$) no 1º Ensaio sem vegetação, considerando $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$.

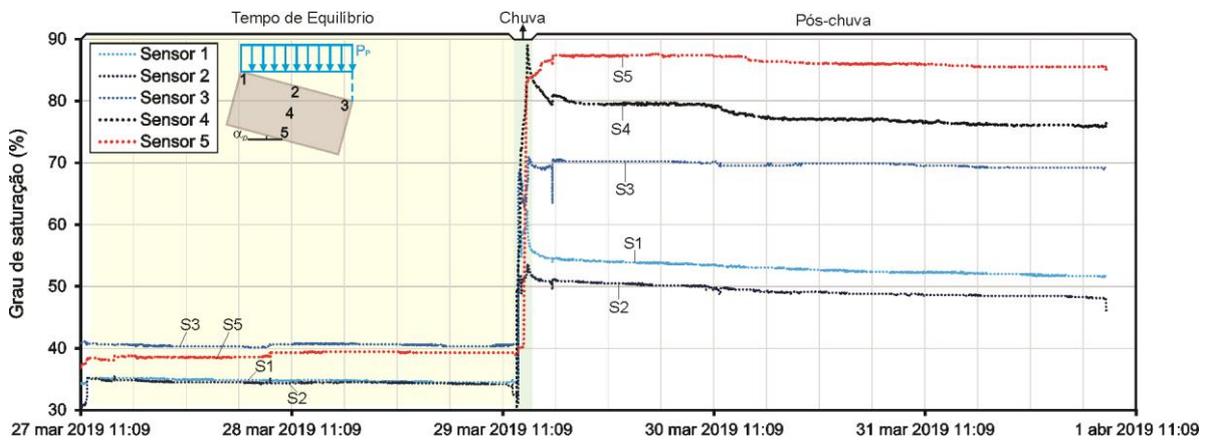


Figura 7.5. Evolução do grau de saturação no 1º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$.

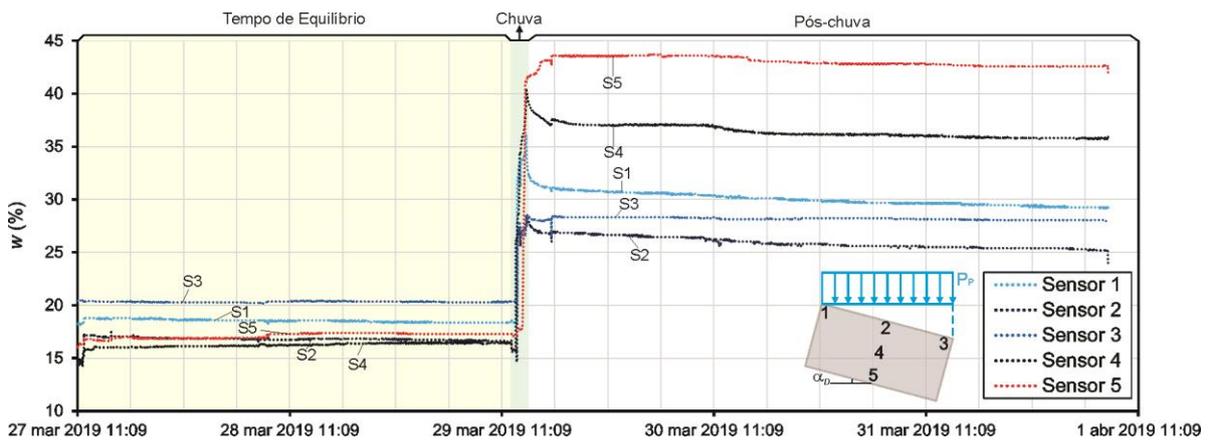


Figura 7.6. Evolução do teor de umidade no 1º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$.

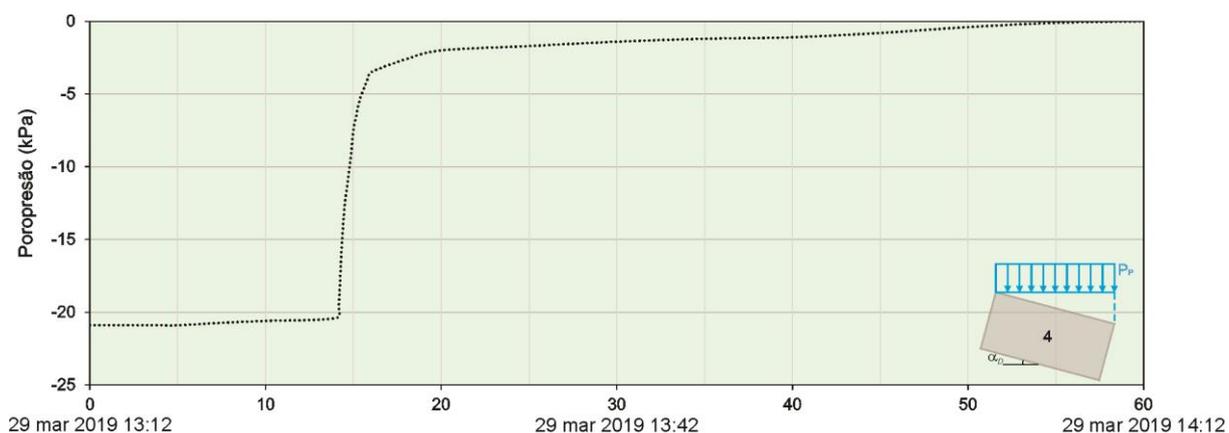


Figura 7.7. Evolução das poropressões durante o momento de aplicação da chuva simulada (SC) para o Ponto 4 para o 1º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$.

Inferem-se das Figuras 7.4 a 7.6 pequenas variações no conteúdo volumétrico de água detectado pelos sensores de umidade no período de monitoramento do tempo de equilíbrio (48 h ou dois dias após a instalação da instrumentação na amostra em posição horizontal sem chuva) e, conseqüentemente, grau de saturação e teor de umidade, ressaltando aumento para os Pontos 4 e 5 e diminuição para os Pontos 1, 2 e 3 (superficiais), em busca do equilíbrio, coerentemente alinhado aos resultados da modelagem numérica apresentada no Capítulo 3.

Durante o ensaio de aplicação da chuva simulada pelo SC (Figuras 7.4 a 7.6) percebe-se que o primeiro sensor de umidade que detecta o aumento do conteúdo volumétrico de água e, conseqüentemente, umidade e saturação é o sensor localizado no Ponto 3 (mais baixo), logo seguido dos Pontos 1 (mais alto) e 2 (ponto médio). Porém, os Pontos 1, 2, e 3 saem da condição inicial de umidade média de 18% atingindo o máximo de 30% ao final do ensaio, diferentemente dos Pontos 4 e 5, que atingem em média 37% e 43%, respectivamente.

Avaliando o período de ensaio pós-chuva, percebe-se a manutenção de maiores umidades nas camadas mais profundas da amostra (43%). Entretanto, menor umidade foi detectada no Ponto 2 da amostra (cerca de 25%) que teve sua condição inicial de aproximadamente 18%.

Não foram detectadas poropressões positivas no Ponto 4 durante os 60 min de simulação de chuva. No entanto, foi alcançada a condição saturada no fim do ensaio. Destaque para o tempo relativamente curto (5 min aproximadamente, intervalo entre 14 e 19 min) para a mobilização de quase 90% da poropressão no Ponto 4 da amostra (Figura 7.7). Fato este, que demonstra que eventos curtos e de alta intensidade pluviométrica em solos expostos podem estar associados geralmente aos deslizamentos superficiais, como consequência da rápida redução da resistência

ao cisalhamento do solo pela diminuição da sucção e aumento das poropressões em um curto espaço de tempo, conforme relatam também Crosta (1998) e Aleotti (2004).

Com relação aos resultados experimentais realizados no simulador de chuva para o 3º Ensaio sem vegetação, demonstrados agora nas Figuras 7.8 a 7.10, no que diz respeito ao conteúdo volumétrico de água, grau de saturação e umidade, apresentam-se muito próximos dos resultados do 1º Ensaio, com diferença apenas no tempo em que ocorrem, consequência da menor intensidade de chuva simulada, agora de $86,0 \text{ mm h}^{-1}$, em contrapartida dos $220,0 \text{ mm h}^{-1}$ do 1º Ensaio.

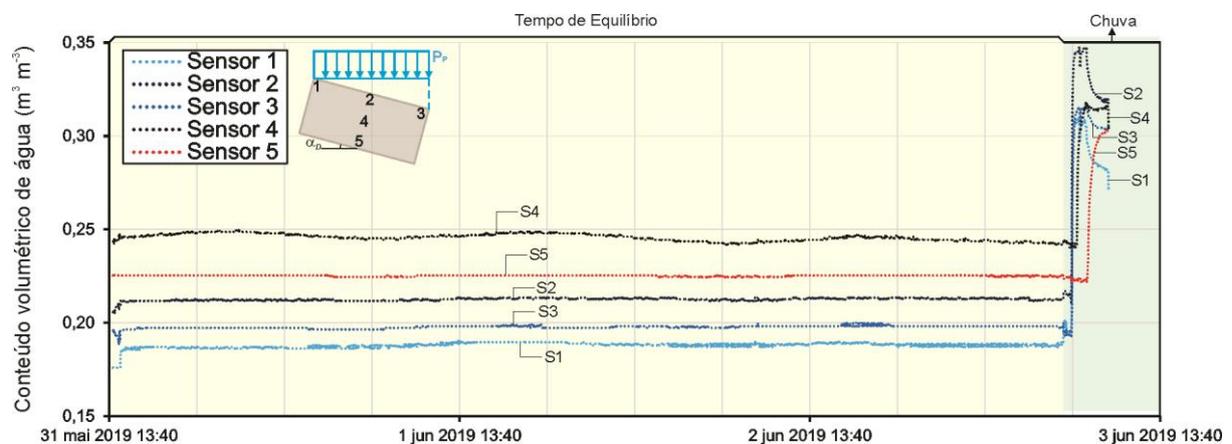


Figura 7.8. Evolução do conteúdo volumétrico de água detectado pelos sensores de umidade ($\theta_{wi,sensor}$) no 3º Ensaio sem vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$.

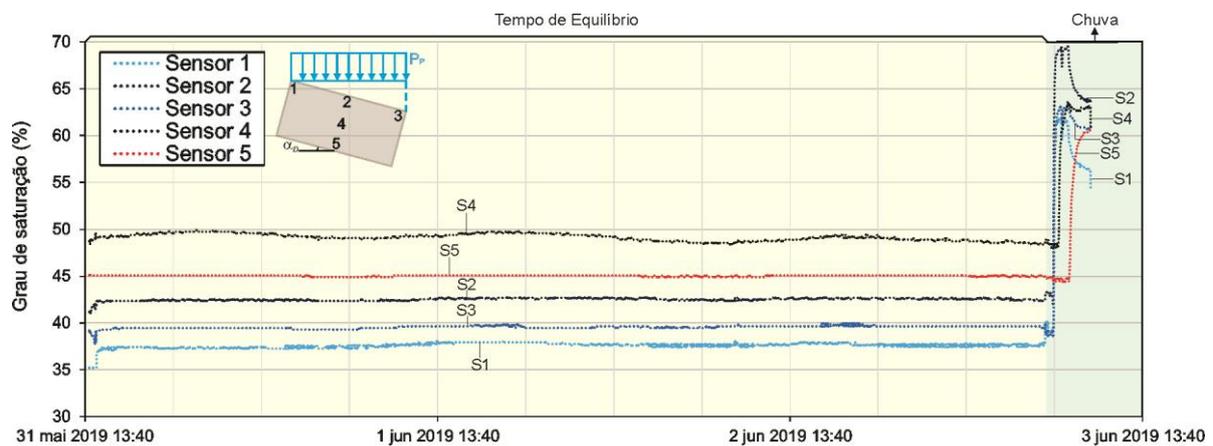


Figura 7.9. Evolução do grau de saturação no 3º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$.

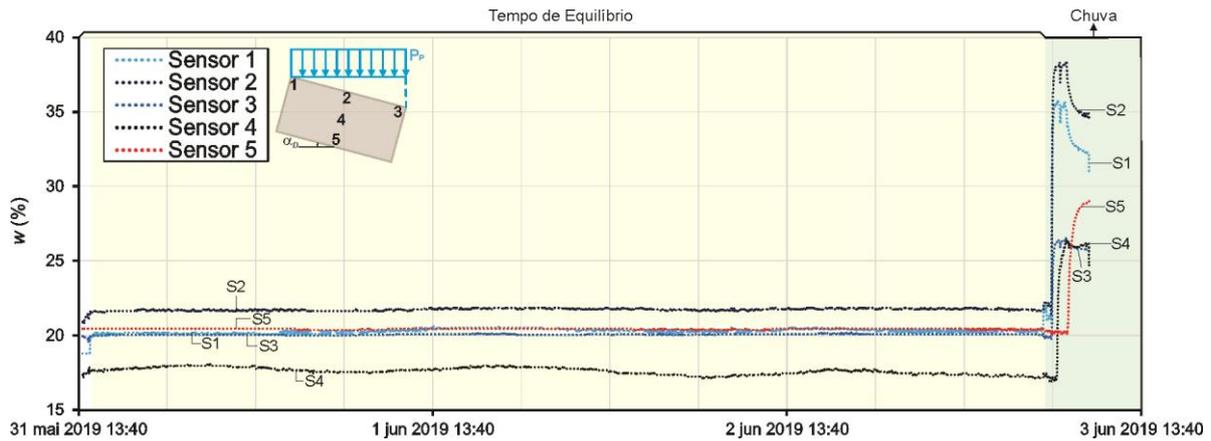


Figura 7.10. Evolução do teor de umidade no 3º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$.

O comportamento das poropressões no decorrer do ensaio realizado no SC (Figura 7.11), agora monitoradas também na superfície da amostra de solo (Pontos 1, 2 e 3), mostra que no 3º Ensaio houve um maior tempo para que a frente de molhagem atingisse o Ponto 4 (metade da espessura da amostra) em comparação com o 1º Ensaio (Figura 7.7), ou seja, aproximadamente sete minutos a mais (Figura 7.12), evidenciando o quanto a intensidade da chuva influencia e interfere nos fenômenos hidrológicos e geotécnicos avaliados.

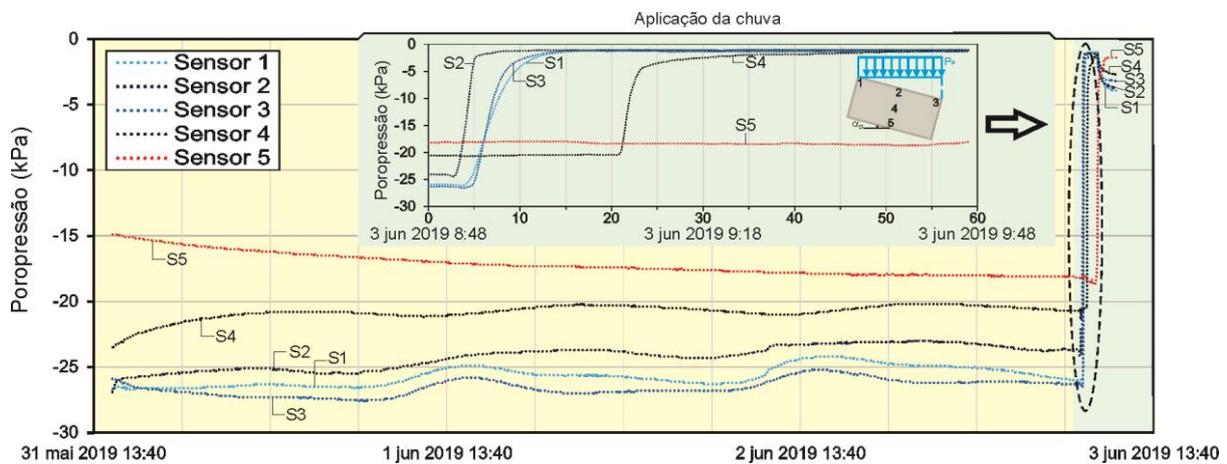


Figura 7.11. Evolução das poropressões para todos os pontos monitorados no 3º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$.

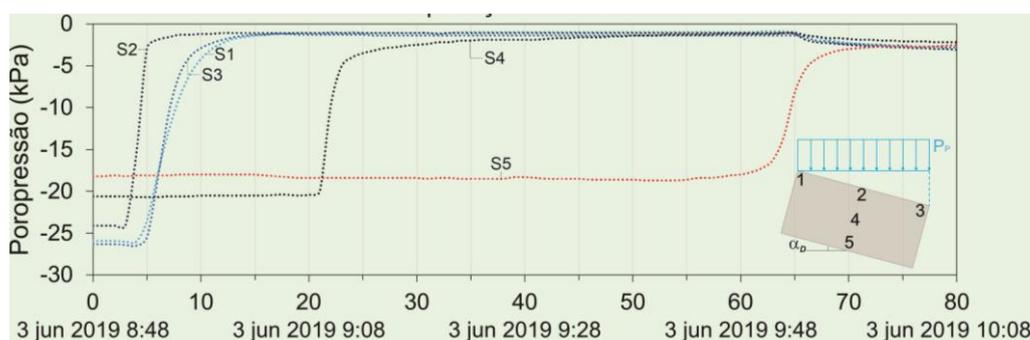


Figura 7.12. Evolução das poropressões no momento da aplicação da chuva simulada para os pontos monitorados no 3º Ensaio sem vegetação, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$.

Outros fatos a se destacar são: a) o tempo prematuro em que as poropressões nas camadas superficiais são mobilizadas, ou seja, dentro de aproximadamente 6 min cerca de 80% das poropressões já estão mobilizadas para contribuir para a geração do escoamento superficial ao longo da superfície (Figura 7.11 e 7.12) e b) a não influência da condição de fronteira do fundo do recipiente acrílico para com a geração do escoamento superficial, justificada pela não chegada da frente de molhagem (infiltração da água precipitada) até o Ponto 5 da amostra durante o tempo de 60 min de simulação da chuva (detalhe da Figura 7.12).

Infere-se ainda da Figura 7.12 que, a frente de molhagem alcança o fundo da amostra ensaiada, ou seja, as poropressões no Ponto 5 são mobilizadas somente após 5 min do término da aplicação da chuva simulada (aproximadamente tempo 65 min) reforçando a não influência da condição de contorno imposta pelo recipiente acrílico na geração do escoamento superficial durante o tempo de ensaio no SC. Outro fato importante a destacar é que, após cessar o fim do ensaio de simulação de chuva (tempo de 60 min), as sucções nos Pontos 1, 2, 3 e 4 (principalmente os pontos da camada superficial) tendem a reestabelecer o aumento gradativo das sucções e, conseqüentemente, dissipação das poropressões (Figura 7.12).

Com relação ao escoamento superficial total e carreamento de sólidos medidos durante os dois ensaios experimentais realizados no simulador de chuvas sem consideração de cobertura vegetativa, destaca-se a grande influência da intensidade de chuva nos processos, provocando diminuição do escoamento superficial total em até cinco vezes e o carreamento de partículas em até dez vezes, considerando as intensidades de chuvas simuladas utilizadas (Figura 7.13).

O processo erosivo foi bem mais acentuado na amostra do 1º Ensaio ($P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$) do que na amostra do 3º Ensaio ($P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$), considerando que todos os parâmetros de entrada do modelo e metodologia de ensaio foram idênticos (Figura 7.13), o que pode também ser observado nas Figuras 7.1 e 7.2. No entanto, os fenômenos de impacto das gotas de chuvas simuladas (energia cinética) e efeito de retenção de água acumulada nas possíveis depressões do solo oriundas do processo de aplicação da chuva simulada não foram considerados na modelagem numérica que representa o funcionamento do modelo físico (SC), sendo sugestões para futuras pesquisas.

Importante destacar que o processo de compactação das amostras reconstituídas de solo afetam sua coesão inicial, ou seja, a coesão do solo na condição indeformada, o que pode ter maximizado o processo erosivo durante os ensaios de precipitação simulada no SC .

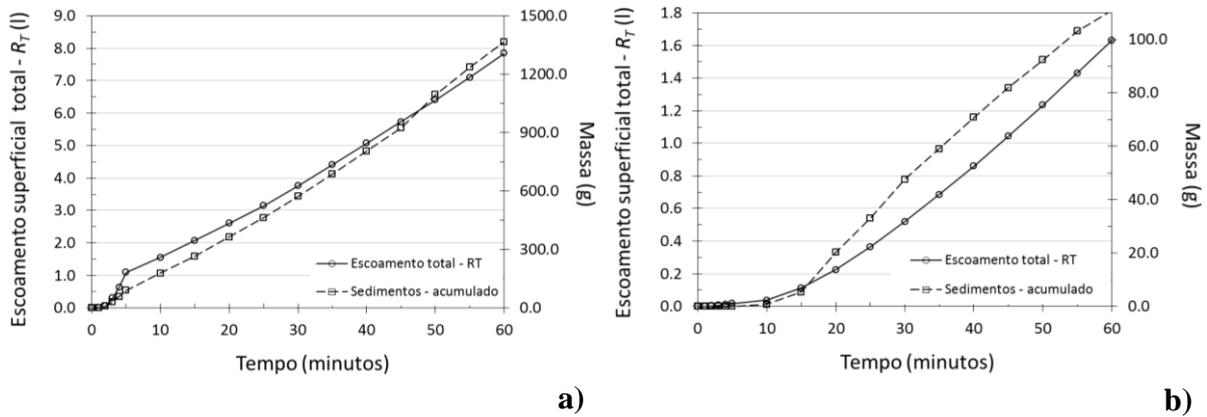


Figura 7.13. Evolução do escoamento superficial total (R_T) e carreamento de solo monitorados no Ponto 3 durante os ensaios realizados no SC sem cobertura vegetativa, considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$: a) 1º Ensaio, $P_P = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$; b) 3º Ensaio, $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$.

A realização do ensaio utilizando cobertura vegetativa do tipo *Paspalum notatum*, bem desenvolvida e homogênea (30 cm de altura), considerando mesma duração e intensidade de chuva simulada do 3º Ensaio sem vegetação, produziu as distribuições de poropressões ilustradas na Figura 7.14 e 7.15. É importante destacar os maiores tempos de alcance da frente de molhagem para todos os pontos monitorados, em especial os Pontos 1 e 2 (superficiais), devido ao poder interceptativo da gramínea, cobertura vegetativa presente, com exceção do Ponto 3.

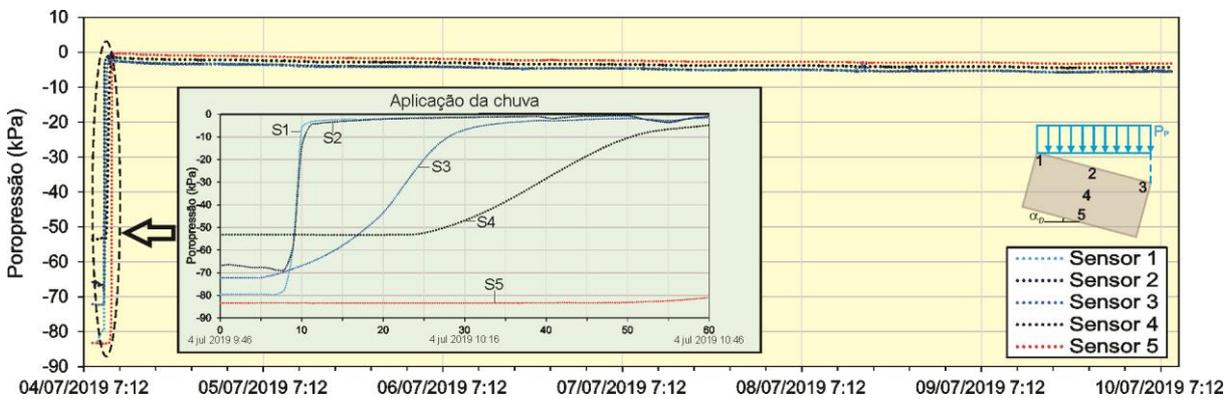


Figura 7.14. Evolução das poropressões para todos os pontos monitorados no 1º Ensaio com vegetação (*Paspalum notatum*), considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$.

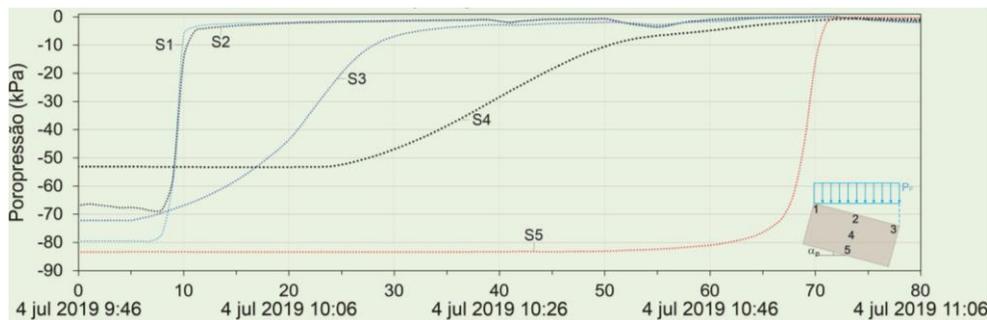


Figura 7.15. Evolução das poropressões no momento de aplicação da chuva simulada para todos os pontos monitorados no 1º Ensaio com vegetação (*Paspalum notatum*), considerando $\alpha_D = 15^\circ$, $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $e_0 = 1,0$.

Em comparação ao mesmo ensaio realizado sem cobertura vegetativa (3º Ensaio, Figura 7.12), percebe-se o comportamento mais gradual e lento das poropressões para as camadas mais profundas das amostras (Ponto 4) e, conseqüentemente, da redistribuição da água ao longo do perfil do solo (Figura 7.15).

Esclarece que durante o ensaio com vegetação, apesar de não ser detectada a chegada da água ao Ponto 5 no modelo numérico, a água alcançou sim o fundo da amostra, no tempo de aproximadamente 68 min, ou seja, 8 min após o fim do ensaio no SC (Figura 7.15). Porém, como nesse caso o fundo do recipiente acrílico não era vedado com as laterais, diferentemente dos outros ensaios sem vegetação, o volume de água era drenado não sendo possível a quantificação. Fato esse que demonstra que a amostra contendo a vegetação gramínea possibilitou maior infiltração devido ao efeito das raízes. A cobertura vegetativa funciona como uma camada superficial armazenadora de água, que a redistribui mais gradativamente ao longo do tempo em uma área (função da espessura e densidade vegetativa), podendo atingir camadas mais profundas do perfil do solo quando comparado à amostra sem vegetação.

Diferentemente dos ensaios realizados no SC sem a presença da vegetação, monitorado por 48 h o estágio do ensaio pré-chuva (avaliação do tempo de equilíbrio), os ensaios com a presença de vegetação preocuparam-se em monitorar o estágio pós-chuva, cerca de uma semana após sua aplicação (Figura 7.14). Neste caso, o estágio de tempo de equilíbrio era desnecessário pelo fato de que não se podia admitir modificações na amostra em função do processo de evapotranspiração imposto pela vegetação. Assim, logo após a instalação da instrumentação, a amostra foi inclinada para a posição desejada e iniciado o processo de aplicação da chuva simulada.

O principal intuito de avaliar o fato anteriormente relatado era compreender como as poropressões se comportariam com a presença da vegetação ao longo do tempo. As poropressões e, conseqüentemente, as sucções foram praticamente mantidas, considerando o ambiente laboratorial (sem muita circulação de ar e intensidade luminosa) que, quando submetida às condições de campo aberto (Figuras 7.14 e 7.15). Sugere-se para estudos que envolvam evapotranspiração trabalhar em ambientes que possibilitem simular condições reais de campo.

Já com relação ao escoamento superficial e o carreamento de partículas sólidas do solo, eles não foram gerados no decorrer do ensaio realizado utilizando cobertura vegetativa do tipo *Paspalum notatum*, durante uma hora de simulação de chuva e inclinação de 15°. Isso evidencia a importância da cobertura vegetal na minimização e controle dos processos erosivos e geração do escoamento superficial.

7.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Após a realização das fases de preparação das amostras e ensaio no SC já descritas anteriormente, procedeu-se com a fase de calibração do modelo numérico a partir dos resultados físicos para amostras sem vegetação, seguindo rigorosamente a metodologia proposta a seguir.

7.2.1 Procedimentos adotados para as amostras compactadas sem vegetação

A interpretação dos resultados dos testes no SC e a calibração do modelo numérico dependem do estabelecimento preciso do estado inicial das amostras ensaiadas. O estado inicial de cada amostra foi estabelecido com base nas condições de compactação do solo. A compactação do solo das amostras foi cuidadosamente controlada conforme procedimentos descritos nos Itens 5.3 e 6.1, respectivamente. O controle e as medições de umidade gravimétrica no decorrer do procedimento de remoldagem das amostras foram cuidadosamente obtidos, sendo três camadas de 10 cm cada, com controle rigoroso da altura da camada e do índice de vazios, inicialmente apresentados no Item 6.1 e Anexos G1 e G2.

A variabilidade dos parâmetros de compactação das camadas individuais, em especial do teor de umidade e da amostra total, foram baixos, apresentando desvio padrão não superior a 0,8 e coeficiente de variação de 5,0% para as camadas individuais de solo das amostras para ambos ensaios sem a presença da cobertura vegetativa (Anexos G1 e G2).

Ressalta-se que durante o procedimento de compactação das amostras, fatores como tamanho e volume, elevada carga de compactação, proteção do molde acrílico para evitar danos, união entre as camadas, baixa umidade relativa do ar, tempo total do procedimento e transporte da amostra compactada ofereceram dificuldades que foram sanadas após o primeiro processo de compactação. Isso aconteceu, pois houve a perda da primeira amostra justamente porque alguns dos fatores anteriormente elencados aconteceram. As amostras seguintes foram produzidas sem contratempos e com boa aceitabilidade, o que pode ser constatado nos baixos valores de variabilidade das amostras apresentados (Anexos G1 e G2).

Dessa forma, o procedimento e a sequência dos cálculos necessários para determinação das condições iniciais de cada ensaio e ajuste da curva característica solo-água para inclusão no modelo numérico foram:

1) determinação do conteúdo volumétrico de água inicial, θ_{wi} , a partir da umidade gravimétrica média, w_i , G_s e índice de vazios, e_o , dos cinco pontos onde os tensiômetros e sensores de umidade estão instalados na parcela amostral, principalmente para o Ponto 4, localizado no meio da amostra, tanto no sentido do comprimento quanto espessura. Posteriormente, para alguns ensaios θ_{wi} foi confrontado com os valores de $\theta_{wi,sensor}$, medidos pelos sensores de umidade para verificar a validade do equipamento e calibração;

2) a partir de θ_{wi} e poropressão inicial, u_{wi} , detectada pelo tensiômetro, conseqüentemente, determinada também a sucção matricial inicial, ψ_i , define-se a condição inicial da amostra para todos os pontos de estudo no recipiente acrílico, em especial, para o Ponto 4 (Tabela 7.2 e Figura 7.16).

Tabela 7.2 - Parâmetros iniciais do solo (Ponto 4) para ajuste da CCSA de molhagem (varredura) para posterior calibração do modelo numérico para ensaio com solo sem vegetação (todos ensaios).

Ensaio	Sensor	w_i (%)	S_i (%)	θ_{wi} (m ³ m ⁻³)	u_{wi} (kPa)	ψ_i (kPa)
1	4	18,03	48,03	0,241	-20,9	20,9
2	4	35,98	95,59	0,480	-2,4	2,4
3	4	17,99	47,91	0,241	-20,6	20,6
4	4	28,37	75,55	0,380	-3,2	3,2

Considerando que a condição inicial da amostra corresponde à condição remoldada, não é claro qual caminho de sucções representativas define a CCSA a ser usada. O procedimento de remoldagem corresponde, em certa medida, a um procedimento de molhagem, no sentido de que um aumento no grau de saturação é imposto pela compactação do solo. No entanto, o procedimento de compactação não pode ser estritamente associado a um procedimento de umedecimento porque o solo compactado está sofrendo mudanças estruturais durante a compactação. Assim, foi ajustada CCSA de varredura, ou seja, curva ajustada para calibração do modelo numérico a partir da condição inicial seguindo a trajetória de molhagem;

3) ajuste dos parâmetros da CCSA de varredura a partir do método proposto por Gitirana Jr. & Fredlund (2004) para solos bimodais seguindo a trajetória de molhagem (Figura 7.16 e Tabela 7.3). Analisando as Tabelas 7.2 e 7.3, percebe-se que tanto o primeiro quanto o terceiro ensaio sem vegetação apresentaram poropressões iniciais muito próximas para o ponto central

da amostra, ou seja, Ponto 4 (-20,9 e -20,6 kPa, respectivamente), comprovando a eficácia do processo de controle de umidade e compactação das amostras;

Tabela 7.3 - Parâmetros de ajustes da CCSA de varredura (Gitirana Jr. & Fredlund, 2004) para a calibração do modelo numérico (sem vegetação, considerando o Ponto 4).

Tipo de curva (CCSA)	ψ_{b1} (kPa)	ψ_{res1} (kPa)	S_{res1} (%)	ψ_{b2} (kPa)	S_b (%)	ψ_{res2} (kPa)	S_{res2} (%)	a_1	a_2	a_3	a_4
1º Ensaio	0,30	6,0	48,00	5.000,0	40,0	22.000,0	4,0	0,080	0,060	0,080	0,080
2º Ensaio	0,19	0,5	91,00	40,0	100,0	22.000,0	4,0	0,050	0,060	0,080	0,080
3º Ensaio	0,30	6,0	48,00	5.000,0	40,0	22.000,0	4,0	0,080	0,060	0,080	0,080
4º Ensaio	0,27	1,2	71,00	500,0	90,0	22.000,0	4,0	0,078	0,060	0,080	0,080

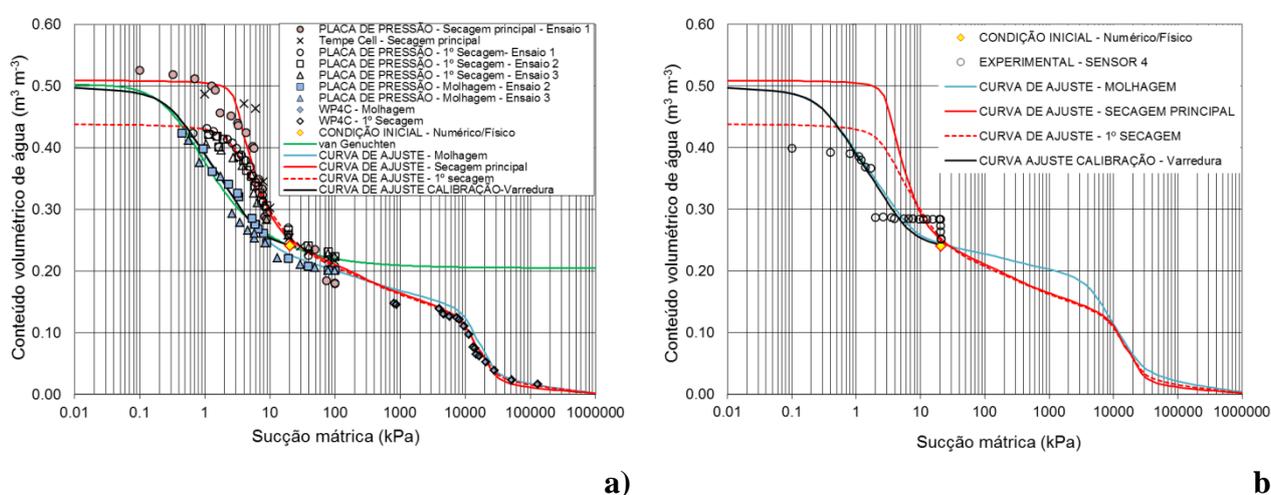


Figura 7.16. Destaque da condição inicial, ajuste dos parâmetros e CCSA de varredura/calibração para avaliação do modelo numérico a partir do modelo físico sem presença de vegetação para o Ponto 4, considerando $P_p = 220,00 \text{ mm h}^{-1}$ para o 1º Ensaio e $86,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o 3º Ensaio:

a) 1º e 3º Ensaio a partir de θ_{wi} e ψ_i ; b) 1º Ensaio a partir de $\theta_{wi,sensor}$ e ψ_i .

Infer-se da Figura 7.16b que os pares ordenados $(\psi_i, \theta_{wi,sensor})$, onde $\theta_{wi,sensor}$ é obtido a partir do sensor de umidade, não trariam ajuste refinado da CCSA, pois, apesar dos sensores estarem instalados no mesmo alinhamento dos tensiômetros, tais sensores detectam o avanço da frente de molhagem (aumento de $\theta_{wi,sensor}$) sem mudança imediata das poropressões, consequentemente, das sucções matriciais. Isso significa que, primeiramente o sensor de umidade detecta o aumento do conteúdo volumétrico de água (devido ao volume de influência de leitura do sensor). Porém, essa água ainda não alcançou a pedra porosa do tensiômetro (medição pontual), mantendo as poropressões e sucções constantes (subida vertical da série Sensor 4 da Figura 7.16b).

A medida que é detectado o aumento das poropressões e diminuição das sucções matriciais (intervalo de 2 a 20 kPa), parece que as variações no conteúdo volumétrico de água não são

percebidas pelo sensor de umidade para o mesmo intervalo de tempo (parte horizontal da série Sensor 4 da Figura 7.16b). Isso pode estar relacionado ou ser reflexo da limitação do equipamento (sensores de umidade e *data logger*), pois, enquanto a poropressão é percebida pelo tensiômetro (diminuição da sucção), o conteúdo volumétrico de água permanece constante, ou seja, parece que o volume de influência de leitura do sensor não foi modificado pelo incremento de água. Para sucções menores que 2 kPa, houve concordância com a curva de molhagem, porém não atingindo o conteúdo volumétrico de água máximo. As diferenças entre o conteúdo volumétrico de água calculado a partir da condição inicial e índices físicos do solo e o detectado pelos sensores de umidade podem ser visualizados nos Anexos H1 e H2.

Já a Figura 7.17 apresenta a condição inicial referente à curva característica do solo-água de outros pontos monitorados na amostra para o 3º Ensaio sem cobertura vegetativa (Pontos 3, 4 e 5) e à curva característica de varredura solo-água, ajustada para posterior calibração do modelo numérico (parâmetros de ajustes apresentados nos Anexos I1 e I3). Salienta-se que, no 3º Ensaio sem vegetação, os pares ordenados sucções versus conteúdos volumétricos de água indicados pelos sensores de umidade, $\theta_{wi,sensor}$, (Figuras 7.17c e 7.17d) representaram muito bem a curva característica de varredura solo-água, diferentemente do 1º Ensaio sem cobertura vegetativa. Fato esse que pode ser justificado por melhores condições de monitoramento (aquisição de novo *data logger* para os cinco pontos amostrais de poropressões) e de calibração da instrumentação utilizada (tensiômetros e sensores de umidade), com melhor ajuste para o Ponto 4;

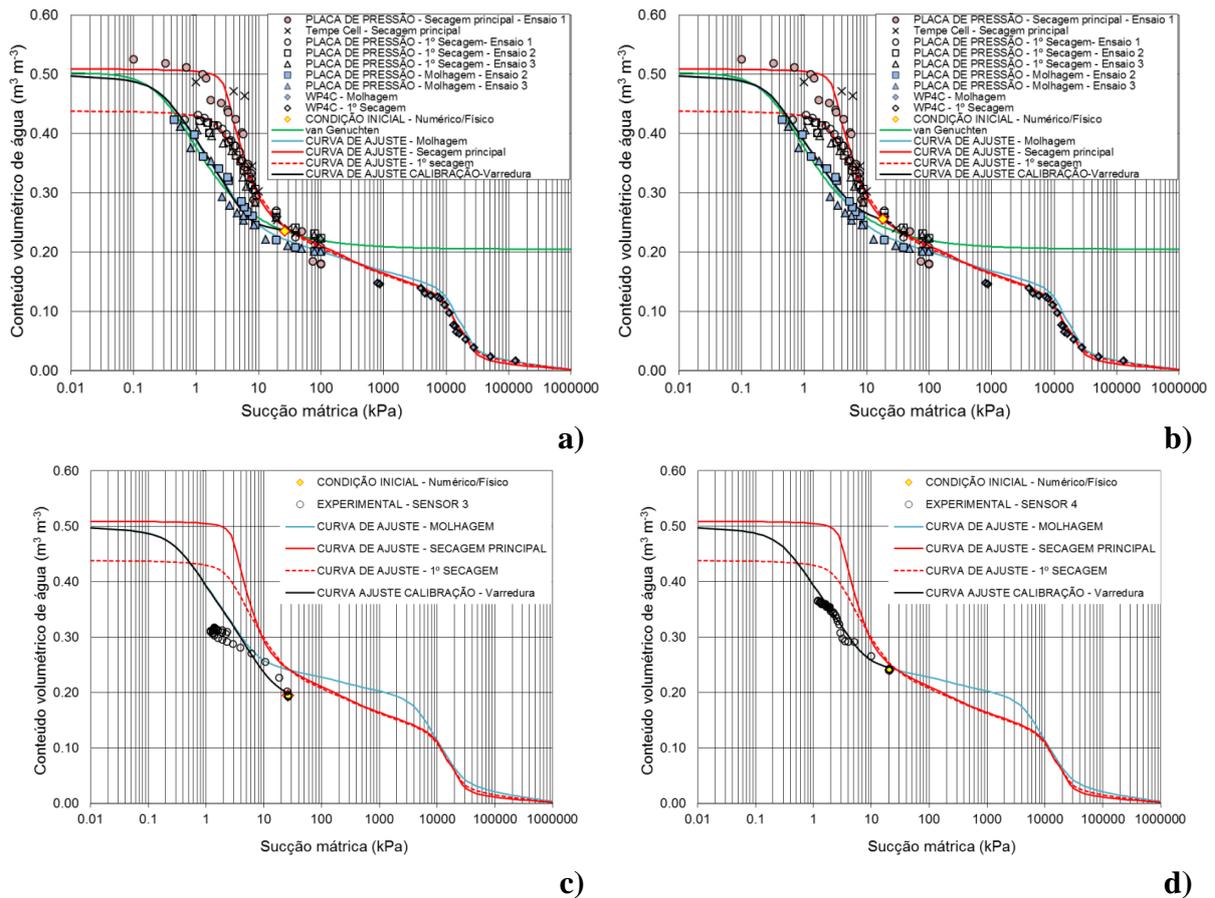


Figura 7.17. Destaque para condição inicial e CCSA de varredura/calibração para modelo numérico a partir do modelo físico sem presença de vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o 3º Ensaio: a) para o Ponto 3 a partir de θ_{wi} e ψ_i ; b) para o Ponto 5 a partir de θ_{wi} e ψ_i ; c) para o Ponto 3 a partir de $\theta_{wi,sensor}$ e ψ_i e d) para o Ponto 4 a partir de $\theta_{wi,sensor}$ e ψ_i .

4) ajuste do valor da intensidade pluviométrica e da inclinação aplicada nas amostras (Tabela 7.1), além da permeabilidade saturada do solo com e sem vegetação;

5) considerar o efeito da rotação da amostra (inclinação), ou seja, mudança nas condições de energia do sistema, a partir da modificação do componente altimétrico em busca de equilíbrio hidráulico, considerando distribuição hidrostática das propressões, conforme equação:

$$(u_a - u_w)_i = \left(y - \frac{H_d}{2} \right) \gamma_w + (u_a - u_w)_o \quad (7.1)$$

onde y é o componente altimétrico do potencial de energia do sistema [L], para o Ponto 4 da amostra (metade da espessura e do comprimento) considerado como $y \cos(-\alpha_D) - x \sin(-\alpha_D)$.

6) por fim, simulação e avaliação dos resultados dos cenários numéricos (propresões, sucções, escoamento superficial pontual, ao longo da superfície e total) frente aos resultados físicos obtidos no SC, ou seja, calibração do modelo numérico, em especial, o parâmetro de permeabilidade saturada do solo com e sem vegetação.

7.2.2 Procedimentos adotados para as amostras compactadas com vegetação

Para a calibração do modelo numérico a partir dos ensaios físicos realizados no SC a partir de amostras reconstituídas com vegetação *Paspalum notatum* (1, 2 e 3º Ensaios, Tabela 7.1) foi necessária a realização de todas etapas descritas anteriormente (Item 7.1.1). Porém, incluindo o efeito da interceptação da cobertura vegetativa utilizada nas amostras.

Ressalta-se que não foi determinada a curva característica solo-água com a presença das raízes por nenhum método, devido à dificuldade de obtenção das amostras reconstituídas, procedimentos e dos tempo de realização dos ensaios. Assim, a modelagem numérica considerando a cobertura vegetativa tomou por base as condições iniciais da vegetação que, para a maioria dos pontos monitorados, está um pouco mais abaixo da curva de molhagem do que para a condição sem vegetação (Figura 7.18), curva característica de varredura solo-água (Tabela 7.4) e o efeito armazenativo da interceptação. Os parâmetros de ajuste curva característica de varredura solo-água para os outros pontos monitorados podem ser visualizados no Anexos I2 e I4.

Tabela 7.4 - Parâmetros de ajustes da CCSA de varredura (Gitirana Jr. & Fredlund, 2004) para a calibração do modelo numérico (com vegetação, considerando o Ponto 4).

Tipo de curva (CCSA)	ψ_{b1} (kPa)	ψ_{res1} (kPa)	S_{res1} (%)	ψ_{b2} (kPa)	S_b (%)	ψ_{res2} (kPa)	S_{res2} (%)	a_1	a_2	a_3	a_4
1º Ensaio	0,30	10,0	39,00	5.000,0	28,7	22.000,0	4,0	0,080	0,071	0,080	0,080
2º Ensaio	0,30	10,0	39,00	5.000,0	28,7	22.000,0	4,0	0,080	0,095	0,080	0,080
3º Ensaio	0,30	3,0	55,00	5.000,0	95,0	22.000,0	4,0	0,080	0,110	0,080	0,080

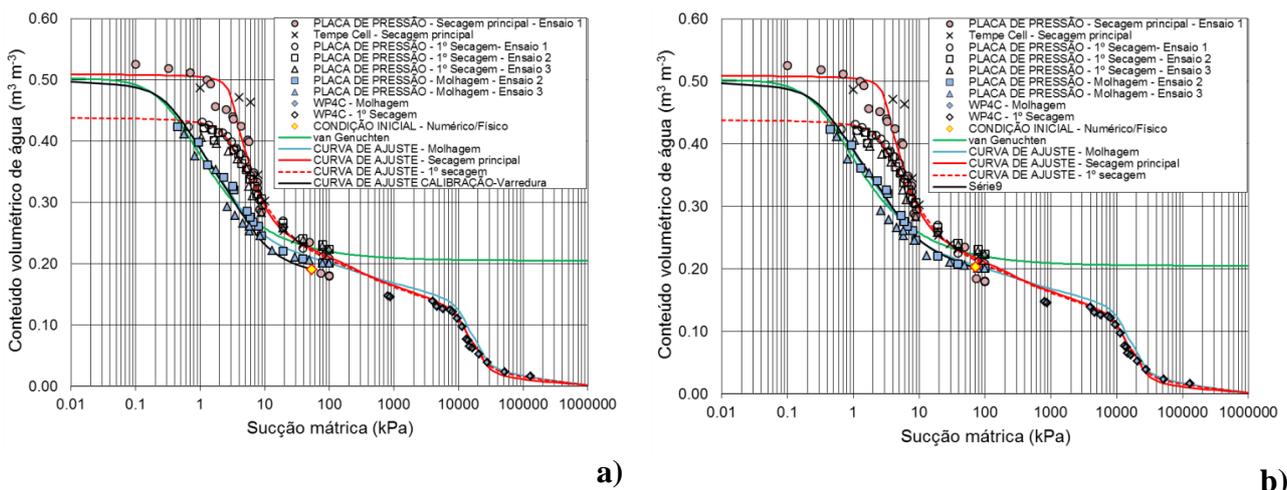


Figura 7.18. Destaque da condição inicial, ajuste dos parâmetros e CCSA de varredura/calibração para avaliação do modelo numérico a partir do modelo físico com presença de vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o 1º Ensaio: a) Ponto 4 a partir de θ_{wi} e ψ_i ; b) Ponto 3 a partir de θ_{wi} e ψ_i .

No modelo numérico, o efeito da interceptação da cobertura vegetativa utilizada (*Paspalum notatum*) foi considerado como uma modificação da condição de fronteira, determinado pelo

tempo de defasagem entre a precipitação simulada e a precipitação efetiva que atinge a superfície do solo ensaiado, ou tempo de interceptação (Figura 7.19), detectado pelos tensiômetros instalados na camada superficial do solo, entre as raízes. Ressalta-se que o valor interceptado de chuva, ou a interceptação, foi considerado com a relação entre o volume de água armazenado pela cobertura vegetativa (sua espessura) e a área correspondente, conseqüentemente, igual ao tempo de interceptação.

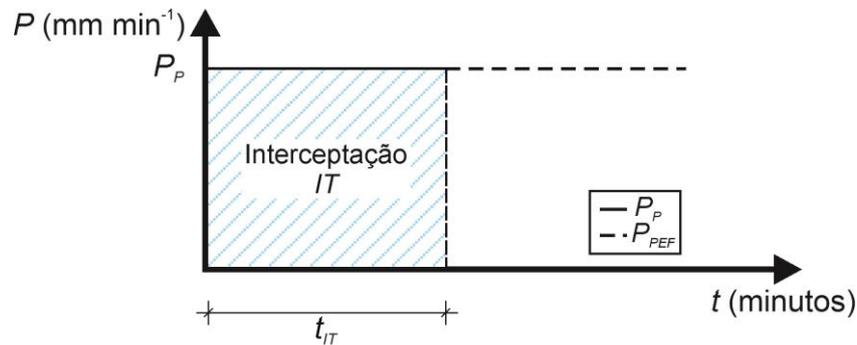


Figura 7.19. Determinação do tempo de interceptação promovido pela espécie vegetativa.

7.2.3 Processo e resultados da calibração do modelo numérico sem vegetação

Após realizados os procedimentos de calibração (seis passos descritos no Item 7.1.1), foram realizadas as simulações em busca do refinamento do modelo numérico desenvolvido no FlexPDE. Verificou-se na primeira simulação que os resultados de poropressão e escoamento superficial e total simulados foram muitos discrepantes em relação aos valores experimentais (medidos e monitorados no modelo físico – SC, Figura 7.20). Fato esse que poderia estar relacionado com a eventualidade dos parâmetros do solo não estarem bem reproduzidos devido ao processo de reconstituição das amostras (compactação), principalmente no que se refere a condutividade hidráulica saturada do solo inicialmente adotada.

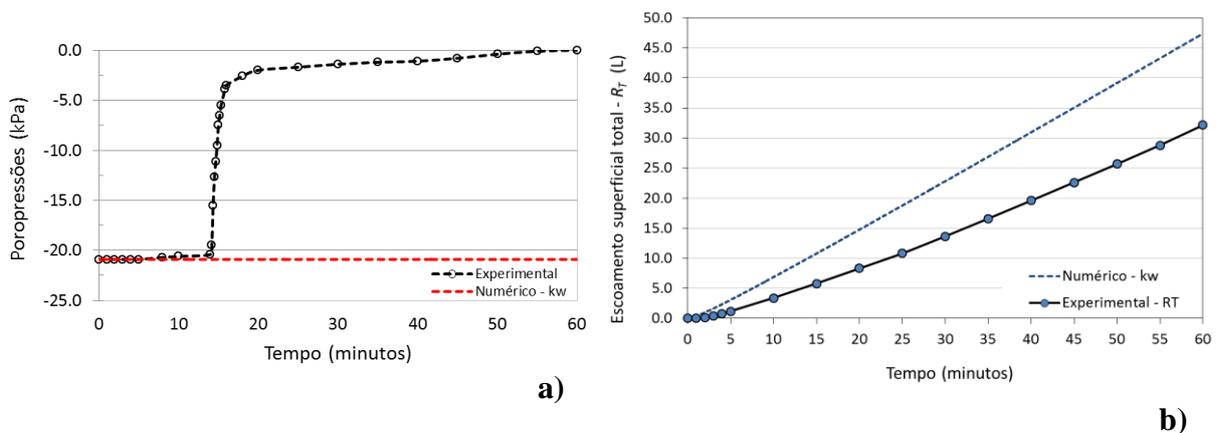


Figura 7.20. Início do processo de calibração numérica para o solo sem vegetação considerando a condutividade hidráulica saturada do solo determinada nos ensaios laboratoriais: a) poropressões no Ponto 4; b) escoamento superficial total.

Como os parâmetros do solo relacionados com a curva característica água-solo foram muito bem determinados laboratorialmente sendo muito confiáveis, não necessitaram ser reajustados. Porém, sabe-se que o parâmetro de condutividade hidráulica saturada do solo pode apresentar maiores variações ao longo do perfil do solo, ou seja, mesmo tendo o bom controle do teor de umidade e condições de compactação, pode-se não conseguir representar bem a condutividade hidráulica saturada do solo em amostras reconstituídas, que no caso sem vegetação foi determinada em $4,8 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, a partir dos ensaios laboratoriais de permeabilidade (triaxiais).

Conforme relatam Franch (2008) e Das & Sobhan (2014), a maioria dos solos não é isotrópico em relação à sua permeabilidade à água, mudando sua magnitude em função da direção do fluxo, como é o caso dos ensaios realizados no simulador de chuva. Portanto, o processo de calibração numérica contou com o ajuste (aumento) do parâmetro condutividade hidráulica saturada do solo, com intuito de melhor convergir os resultados do modelo numérico e físico, além de estabelecer menores índices de erros (Figuras 7.21 e 7.22). Uma justificativa coerente para isso é o aumento deste parâmetro do solo durante o processo de calibração do modelo numérico, visto que a condutividade hidráulica saturada do solo na condição horizontal, k_H , é maior que na condição vertical, k_V , também justificado por Franch (2008).

Na Tabela 7.5 é apresentado um resumo de alguns estudos relativos à relação k_H/k_V na condição saturada para solos finos granulares com ampla faixa de variação.

Tabela 7.5 - k_H/k_V para solos granulares finos por diferentes autores.

Tipo de solo	k_H/k_V	Referência
Silte orgânico com turfa	1,2 a 1,7	Tsien (1955)
Argila marinha plástica	1,2	Lumb & Holt (1968)
Argila fofa	1,5	Basett & Brodie (1961)
Argila varvítica	1,5 a 1,7	Chan & Kenney (1973)
Argila varvítica	1,5	Kenney & Chan (1973)
Argila varvítica	3,0 a 15,0	Wu <i>et al.</i> (1978)
Argila varvítica	4,0 a 40,0	Casagrande & Poulos (1969)

Fonte: adaptado de Das & Sobhan (2014).

A Figura 7.21a ilustra os resultados do processo de calibração do modelo numérico no que diz respeito à evolução das poropressões ao longo do 1º Ensaio de chuva realizado no SC sem o efeito da vegetação (solo exposto) para o ponto central da amostra ensaiada, sendo que a Figura 7.22a ilustra o mesmo para o 3º Ensaio de chuva sem vegetação.

Os resultados referentes ao índice de erro RMSE, considerados satisfatórios ($< 0,05$), também podem ser visualizados nas Figuras 7.21b e 7.22b, respectivamente, para o 1º e o 3º Ensaio sem a presença da cobertura vegetal. Destaque deve ser dado para os ótimos resultados numéricos

alcançados no 3º Ensaio referente à evolução das poropressões no Ponto 4 (RMSE igual a 0,019), considerando o modelo calibrado a partir do estabelecimento de condutividade hidráulica saturada do solo cinco vezes maior que a determinada nos ensaios laboratoriais, ou seja, de $2,4 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$.

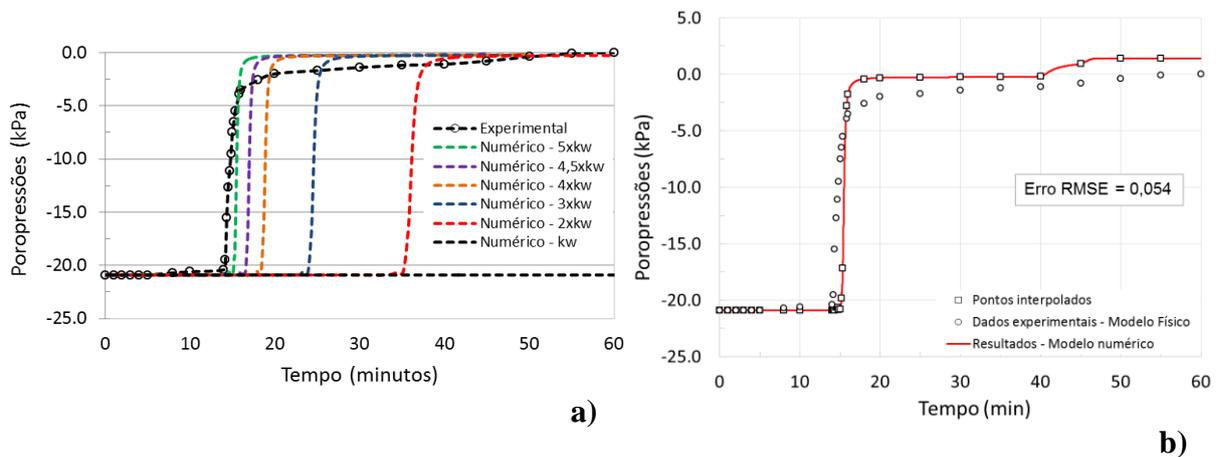


Figura 7.21. Processo de calibração e validação numérica a partir do resultado do 1º Ensaio físico sem presença de vegetação, considerando $P_p = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o Ponto 4: a) modificando a condutividade hidráulica saturada do solo, k_{sat} ; b) erro RMSE.

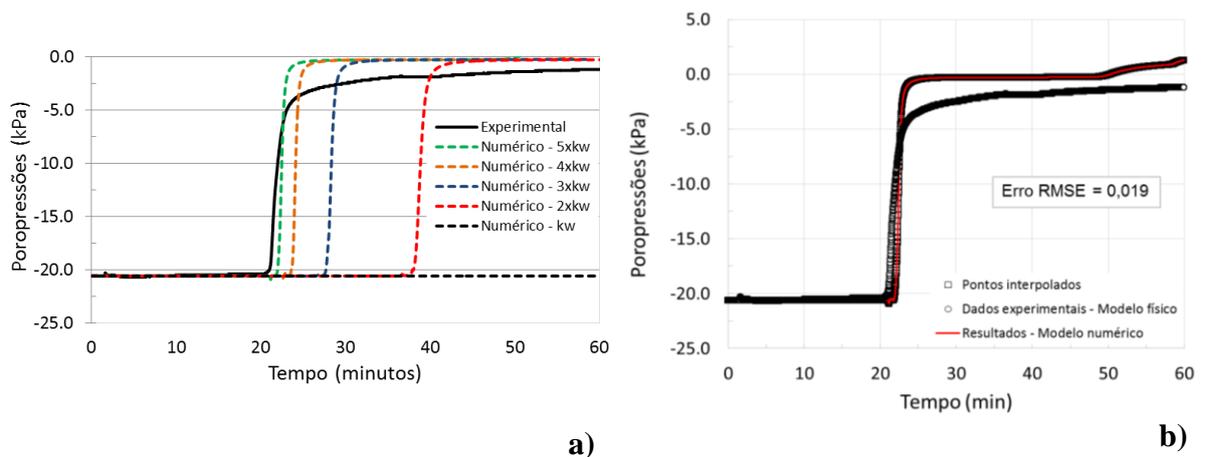


Figura 7.22. Processo de calibração e validação numérica a partir do resultado do 3º Ensaio físico sem presença de vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o Ponto 4: a) modificando a condutividade hidráulica saturada do solo, k_{sat} ; b) erro RMSE.

Ressalta-se o grande custo computacional e o tempo necessário para concluir a simulação numérica de cada cenário, em média 74 h ou aproximadamente três dias para um tempo de duração de chuva de uma hora, correspondente ao que foi realizado no modelo físico, perfazendo aproximadamente 20 dias de simulações simultâneas em mais de uma máquina para finalizar todo o processo.

As Figuras 7.23 e 7.24 demonstram os resultados de escoamento superficial instantâneo e total para cada cenário (modificação do parâmetro de condutividade hidráulica saturada do solo em até cinco vezes o seu valor inicial) simulado numericamente na fase de calibração do modelo

dos ensaios realizados sem a vegetação. Tais resultados apresentam boa convergência entre os dados quando se considera a condutividade hidráulica saturada do solo como cinco vezes maior que a inicial.

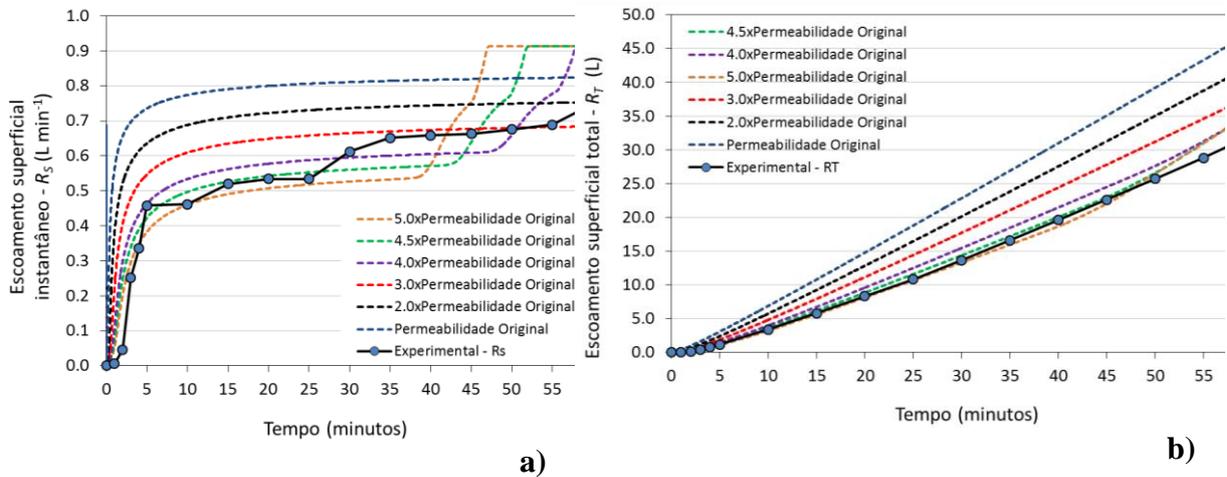


Figura 7.23. Processo de calibração numérica a partir do resultado do 1º Ensaio físico sem presença de vegetação, considerando $P_p = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o Ponto 4: a) escoamento superficial instantâneo, R_S ; b) escoamento superficial total, R_T .

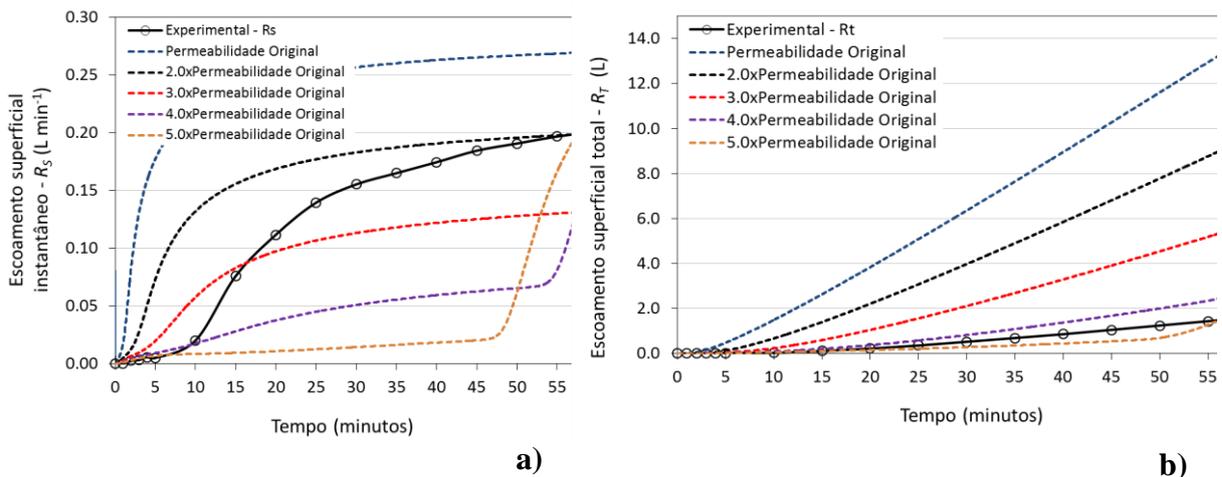


Figura 7.24. Processo de calibração numérica a partir do resultado do 3º Ensaio físico sem presença de vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$ para o Ponto 4: a) escoamento superficial instantâneo, R_S ; b) escoamento superficial total, R_T .

Na Figura 7.25 são indicados os baixos índices de erros RMSE encontrados para os outros pontos monitorados no 3º Ensaio sem vegetação (menores que 0,17), sendo os Pontos 1, 2 e 3 localizados mais superficialmente e o Ponto 5 no fundo da amostra.

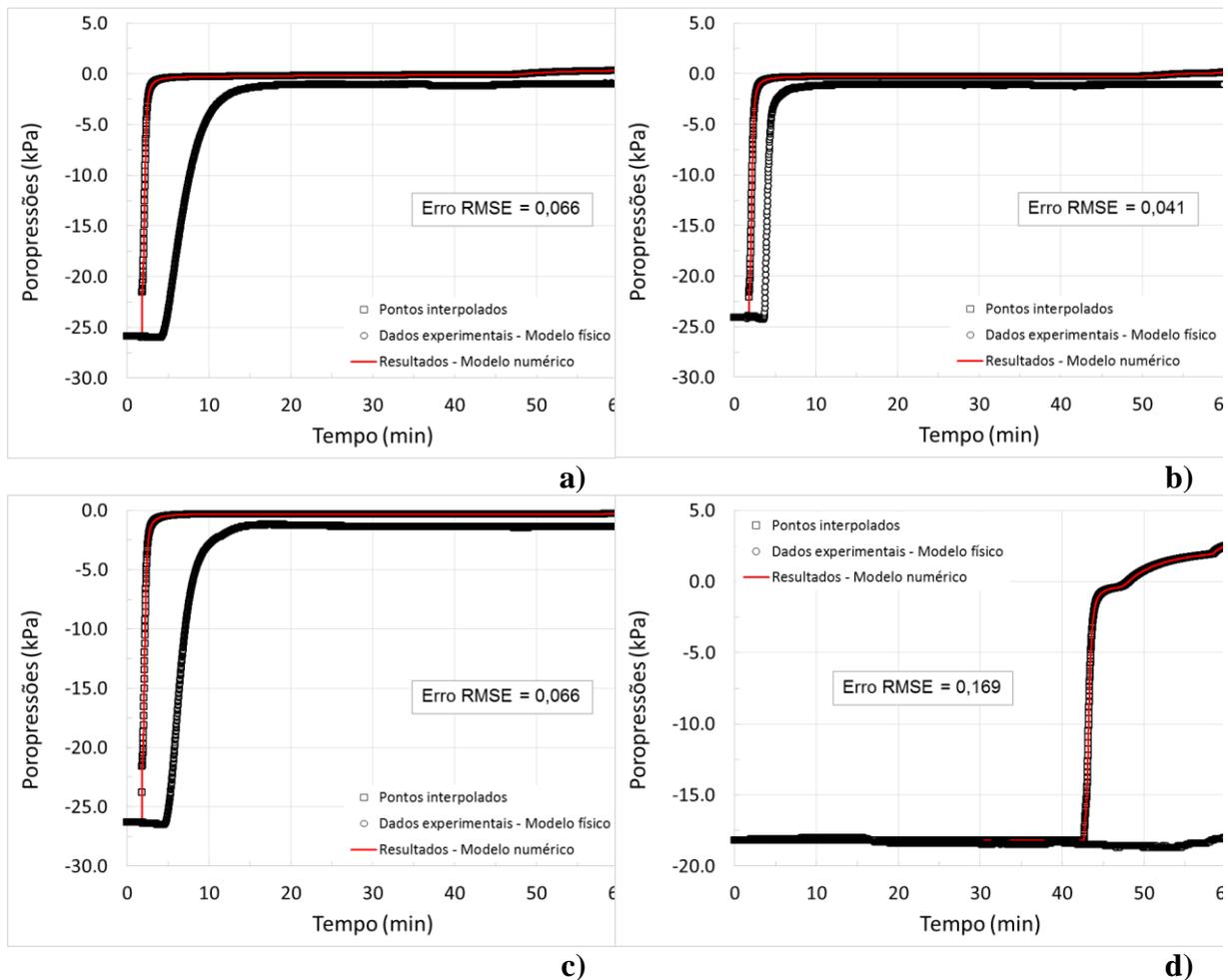
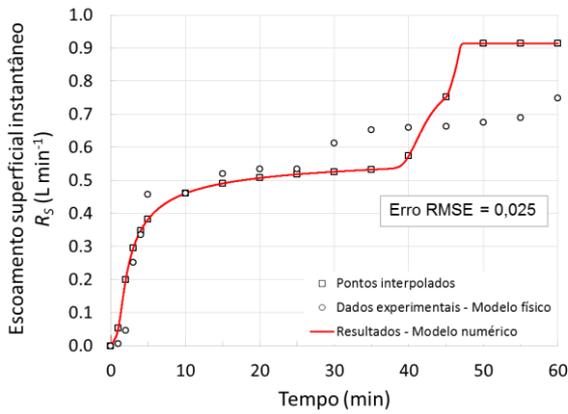
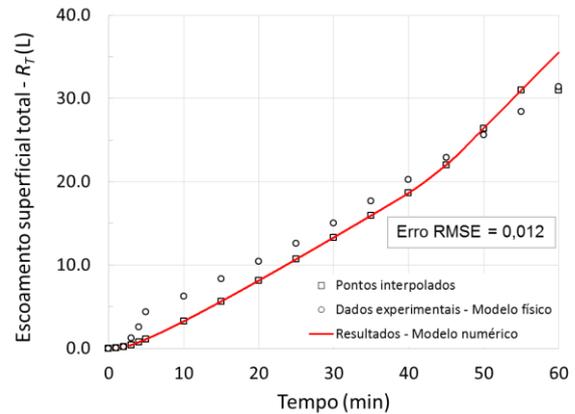


Figura 7.25. Índices de erro RMSE com relação às poropressões nos pontos monitorados para o 3º Ensaio sem presença de vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$: a) Ponto 1; b) Ponto 2; c) Ponto 3 e d) Ponto 5.

Acerca do índice de erro RMSE relativo à avaliação do escoamento superficial instantâneo e total previsto no modelo numérico em relação ao que foi medido no modelo físico (SC), eles apresentaram-se menores que os anteriormente calculados para as poropressões, em ambos ensaios realizados sem presença da vegetação (Figuras 7.26 e 7.27). É de se ressaltar que o erro RMSE referente ao escoamento superficial total (acumulado ao longo da superfície e tempo, Figuras 7.26b e 7.27b) foi relativamente menor quando comparado ao escoamento superficial instantâneo (apenas ao longo da superfície, Figuras 7.26a e 7.27a), podendo o comprimento da amostra, L_D , ser o influenciador desses resultados.

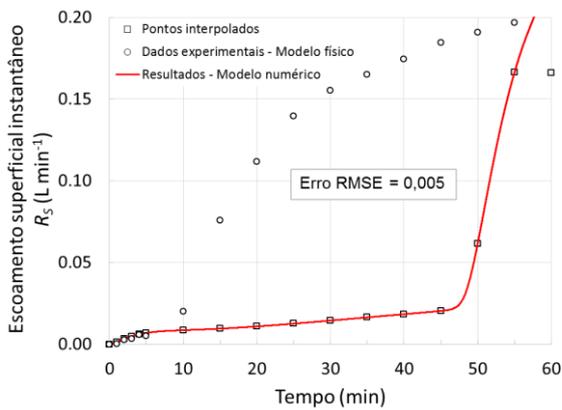


a)

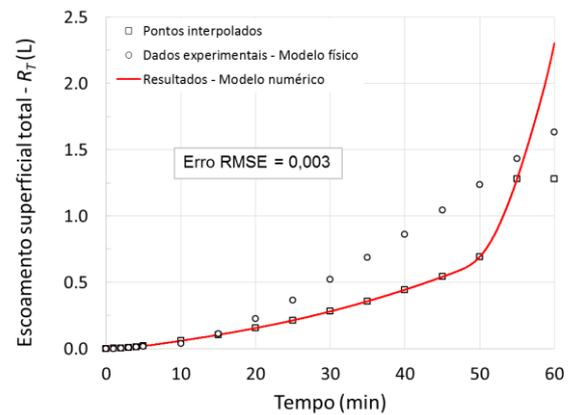


b)

Figura 7.26. Índices de erro RMSE com relação ao escoamento superficial para o 1º Ensaio sem presença de vegetação, considerando $P_p = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$: a) instantâneo, R_s ; b) total, R_T .



a)



b)

Figura 7.27. Índices de erro RMSE com relação ao escoamento superficial para o 3º Ensaio sem presença de vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$: a) instantâneo, R_s ; b) total, R_T .

7.2.4 Processo e resultados da calibração do modelo numérico considerando o efeito da cobertura vegetativa

O efeito da interceptação da cobertura vegetativa utilizada no modelo numérico foi considerado como uma modificação da condição de fronteira, determinada pelo tempo de defasagem entre a precipitação simulada e a precipitação efetiva que atinge a superfície do solo ensaiado, como já exposto anteriormente no Item 7.1.2. Procurou-se identificar os tempos de interceptação, t_{IT} , para os pontos monitorados na condição de fronteira solo-atmosfera (camada superficial, ou seja, Pontos 1, 2 e 3), que em média ficaram em torno de 8 min, ou seja, 8 mm de interceptação da chuva simulada de $86,0 \text{ mm h}^{-1}$ (Figuras 7.28 a 7.30).

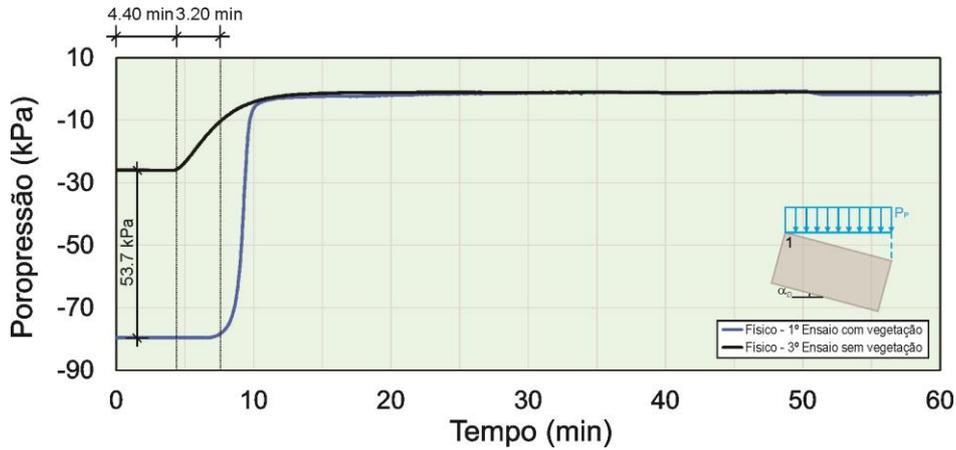


Figura 7.28. Evolução das poropressões para o Ponto 1, 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$.

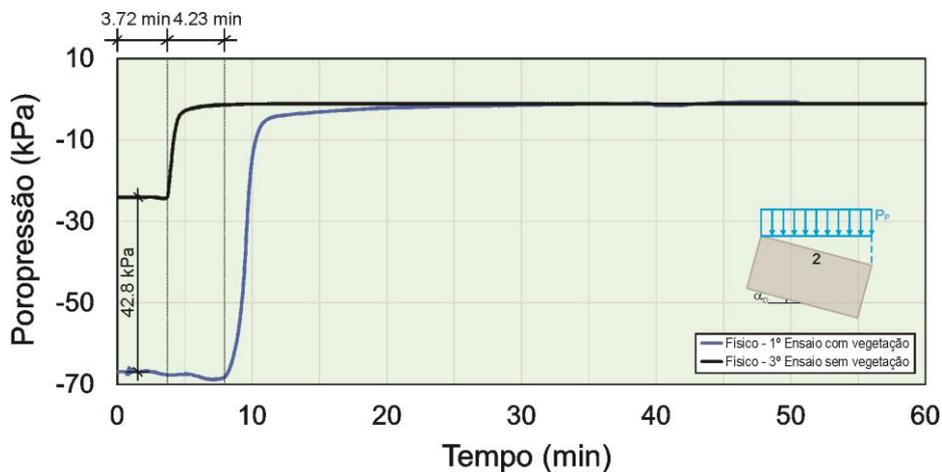


Figura 7.29. Evolução das poropressões para o Ponto 2, 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$.

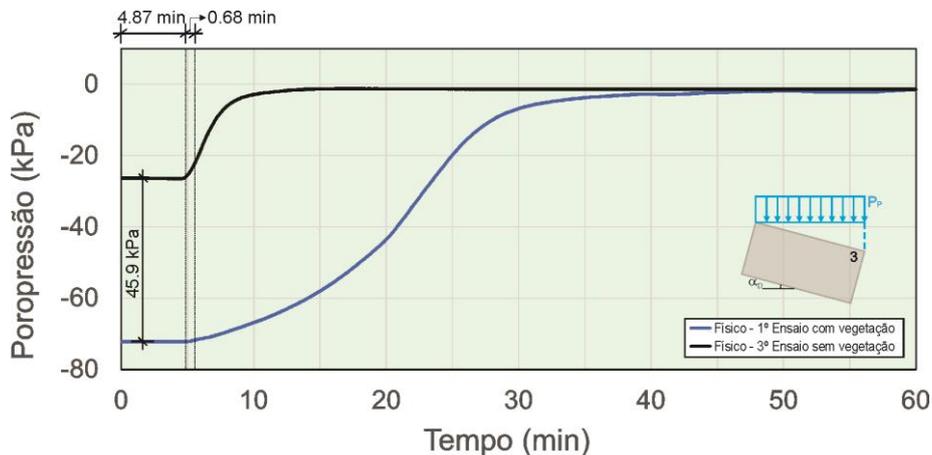


Figura 7.30. Evolução das poropressões para o Ponto 3, 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$

Com relação ao Ponto 3, também localizado na superfície do solo vegetado, porém, em local mais baixo ou jusante da amostra, ele apresentou quase que o mesmo tempo de início de detecção de chegada da água (frente de molhagem), com um atraso de apenas 0,7 min, apresentando distribuição de poropressões com mesmo comportamento para o solo sem

vegetação, diferenciando apenas no que concerne o tempo de infiltração, ou seja, aumento de aproximadamente 34 min para dissipação da poropressão (Figura 7.30). Ressalta-se que o tempo de interceptação do Ponto 3 não foi utilizado para a calibração numérica, apenas os dos Pontos 1 e 2.

Dessa forma, procedeu-se com a calibração numérica adotando tempo médio de interceptação de 8 min e distribuição da água de chuva simulada de forma contínua e homogênea ao longo da superfície do solo após o tempo estabelecido, obtendo os resultados apresentados nas Figuras 7.31 a 7.35 para os pontos monitorados na amostra.

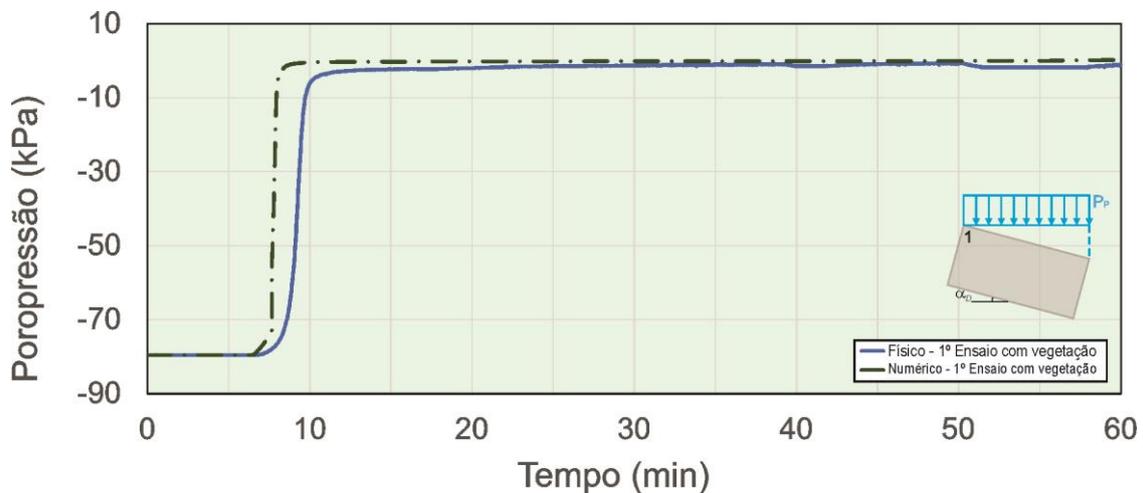


Figura 7.31. Evolução das poropressões para o Ponto 1 durante o processo de calibração numérica do 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$.

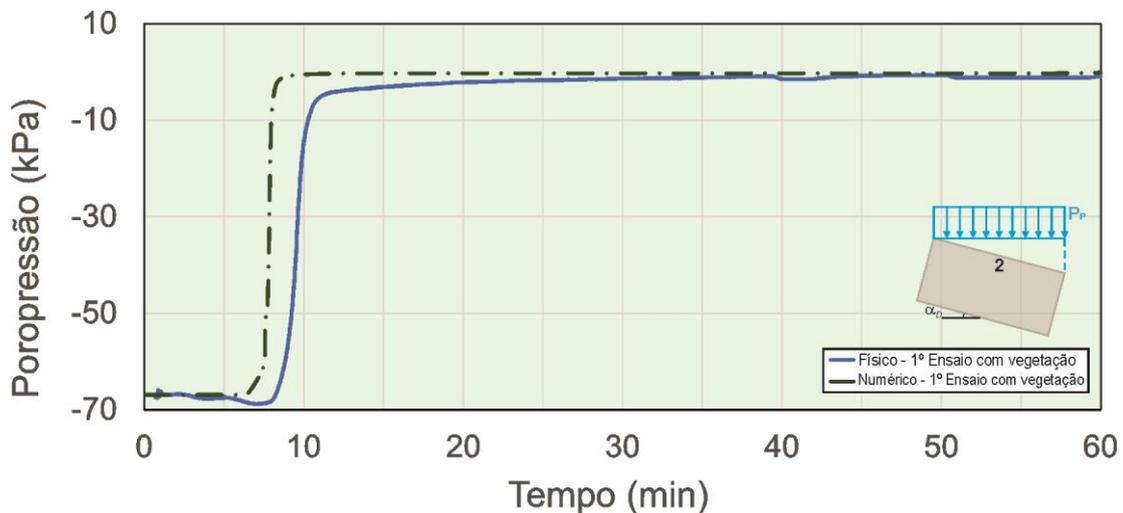


Figura 7.32. Evolução das poropressões para o Ponto 2 durante o processo de calibração numérica do 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$.

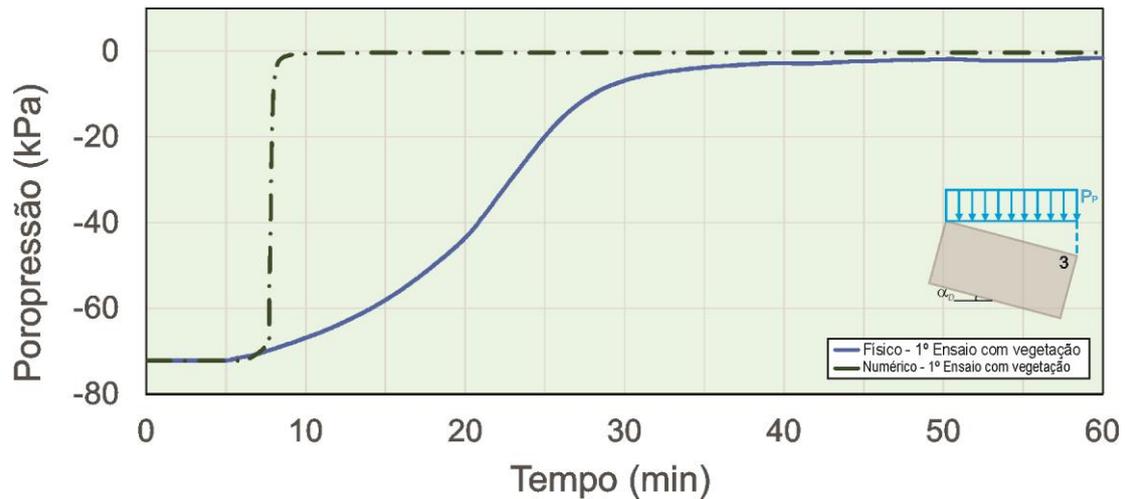


Figura 7.33. Evolução das poropressões para o Ponto 3 durante o processo de calibração numérica do 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$.

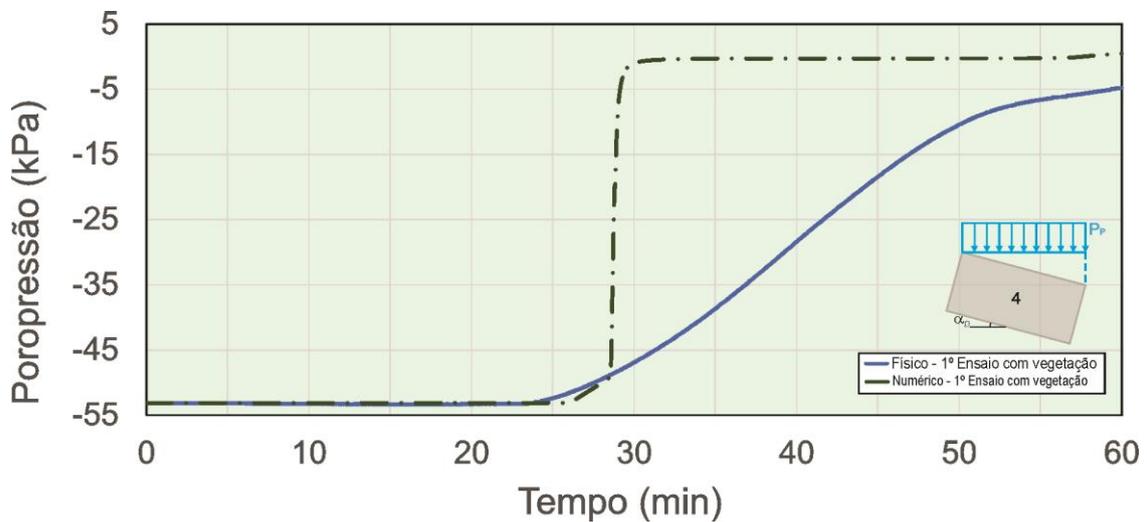


Figura 7.34. Evolução das poropressões para o Ponto 4 durante o processo de calibração numérica do 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$.

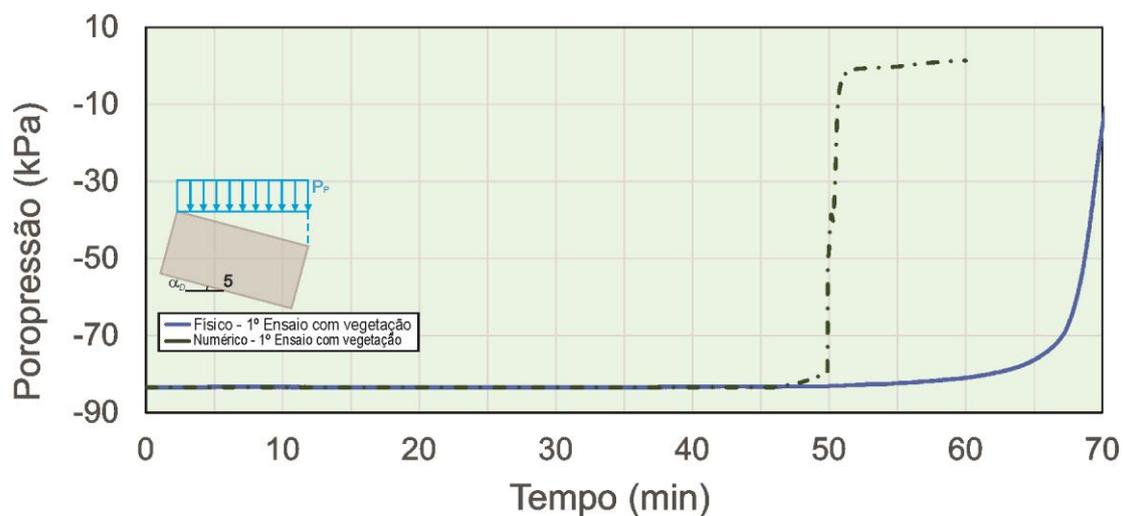


Figura 7.35. Evolução das poropressões para o Ponto 5 durante o processo de calibração numérica do 1º Ensaio com vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$, $e_0 = 1,0$.

Na Figura 7.36 são indicados os baixos índices de erros RMSE relativos à distribuição das poropressões para os Pontos superficiais 1 e 2 no 1º Ensaio com vegetação (menores que 0,11), sendo maiores para os Pontos 3, 4 e 5 (menores que 0,29). Esses índices de erros, ainda satisfatórios, foram maiores quando comparados com os resultados do 3º Ensaio sem vegetação em função da complexidade de simular numericamente os efeitos de interceptação e presença das raízes da espécie vegetativa utilizada.

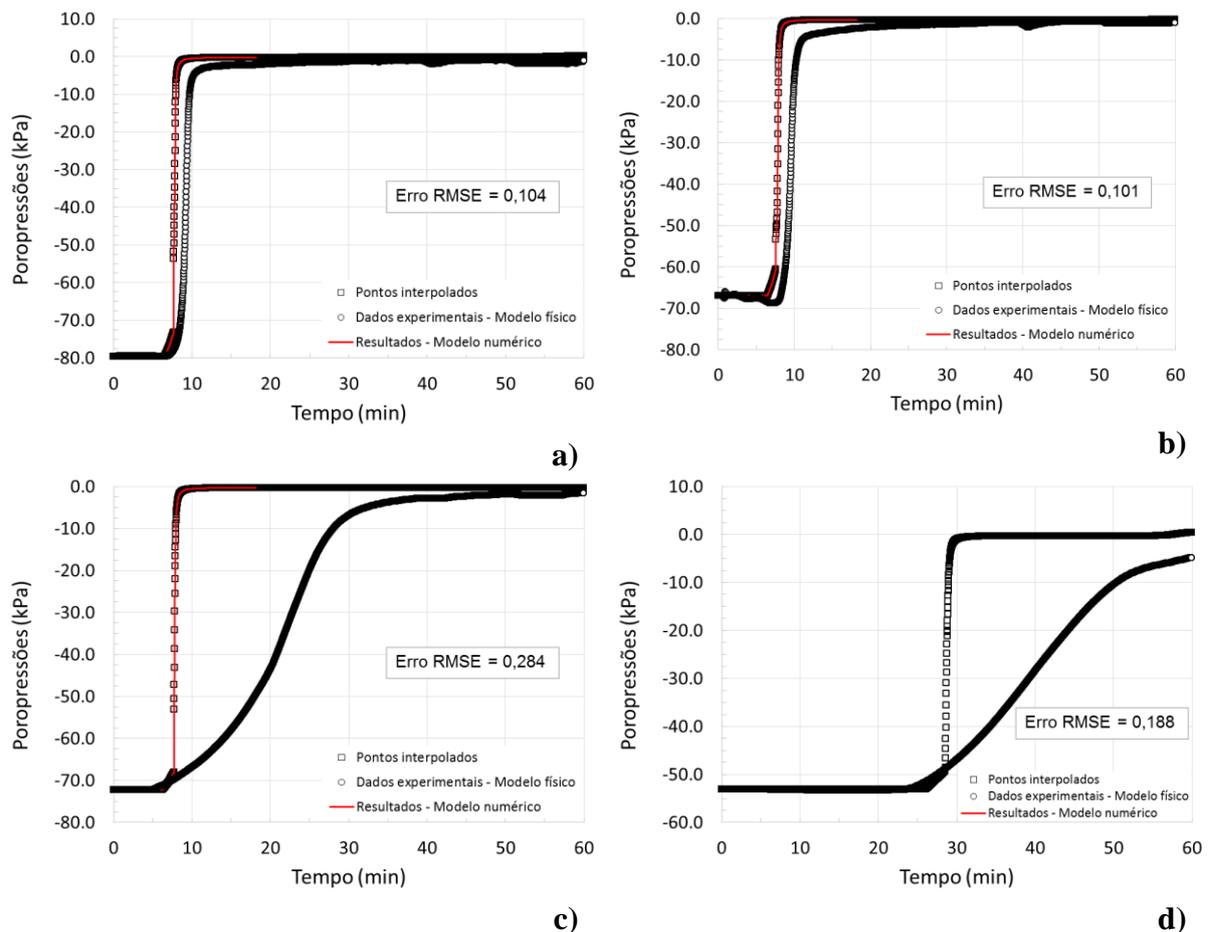


Figura 7.36. Índices de erro RMSE com relação às poropressões nos pontos monitorados para o 1º Ensaio com presença de vegetação considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$: a) Ponto 1; b) Ponto 2; c) Ponto 3 e d) Ponto 4.

Ponto importante a destacar sobre esta abordagem numérica adotada está relacionado com a redistribuição da água armazenada (retida) na vegetação para as camadas do solo, considerada nesta pesquisa uniforme ao longo da superfície da amostra ensaiada, mesmo o modelo físico indicando tempos de interceptação diferentes entre os pontos monitorados, principalmente para o Ponto 3 (exutório). Esse fato gerou bons resultados numéricos representando a superfície do solo (região radicular) mais a montante da amostra (Pontos 1 e 2) no que se trata a evolução das poropressões (índice de erro RMSE baixo, ou seja, menores que 0,11). Porém, os resultados são menos representativos, mas ainda satisfatórios para os pontos superficiais mais a jusantes

(Ponto 3) e profundos do solo (Pontos 4 e 5), apresentando maior índice de erro RMSE de 0,33 para o Ponto 5, possivelmente relacionado com a não consideração do efeito das raízes neste redistribuição de água para estes pontos das amostras.

No que se refere ao escoamento superficial, seja ele instantâneo ou total, o mesmo não foi gerado na amostra com vegetação ensaiada no simulador de chuva (1º Ensaio no modelo físico). Porém, as simulações numéricas indicaram um pequena geração de escoamento superficial instantâneo no final do ensaio de aplicação da chuva simulada (após 55 min), refletindo também em muito baixo escoamento superficial total, Ponto 3 (Figura 7.37). Tal fato, ou seja, a indicação no modelo numérico de geração de escoamento superficial, pode estar relacionado a possíveis imperfeições da condição de contorno imposta pelo modelo físico (folga ou espaço entre o solo da amostra e recipiente acrílico) que, ao invés de proporcionar a medição desses pequenos escoamentos, permitiu sua infiltração na amostra.

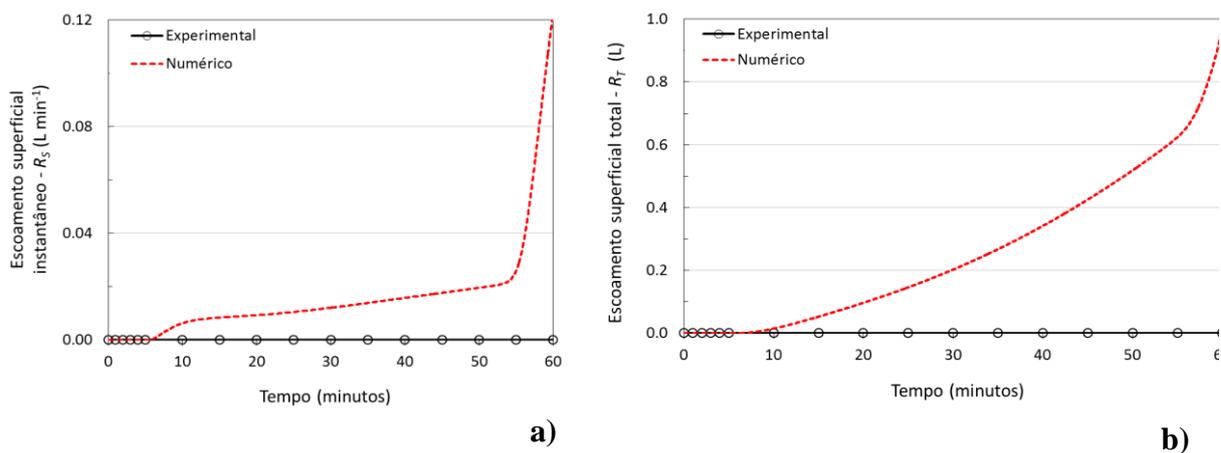


Figura 7.37. Valores de escoamento superficial para o 1º Ensaio com presença de vegetação, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$: a) instantâneo, R_S ; b) total, R_T .

Os índices de erros RMSE referentes aos diferentes tipos de escoamento superficial analisados, considerando a cobertura vegetativa utilizada (Figura 7.38), mostraram-se menores com relação à distribuição das poropressões (Figura 7.36) e parecidos com os do 3º Ensaio sem vegetação (Figura 7.27). Isso reforça os bons resultados numéricos alcançados após processo de calibração, mesmo utilizando simplificação no processo de interceptação, ou seja, considerando-a com redistribuição constante ao longo da superfície da amostra.

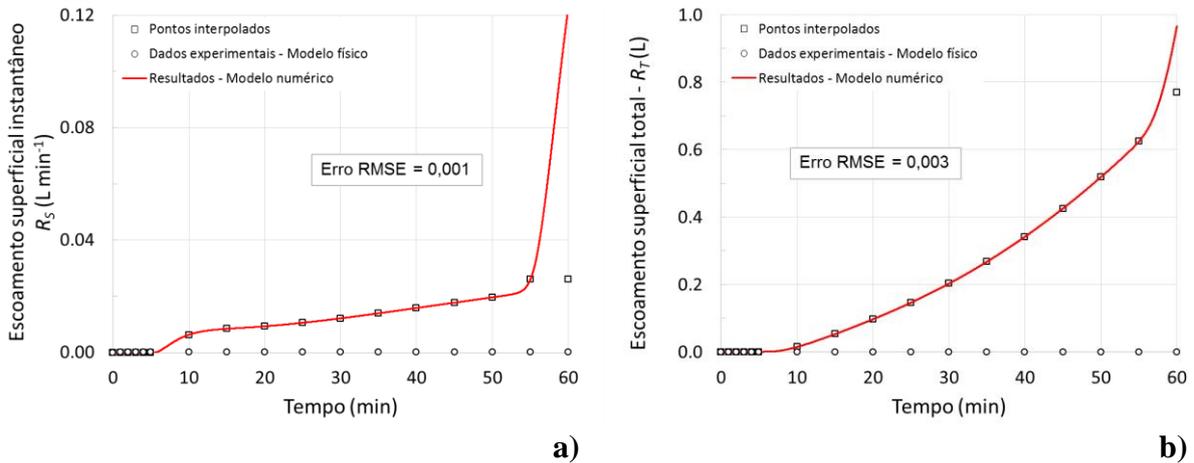


Figura 7.38. Índices de erro RMSE com relação ao escoamento superficial para o 1º Ensaio com presença de vegetação, considerando $P_P = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$: a) instantâneo, R_S ; b) total, R_T .

Com intuito de diminuir os erros (Figuras 7.36 e 7.38) e melhor representar o processo de redistribuição da água acumulada pela interceptação vegetativa para as camadas mais profundas do solo com vegetação (Pontos 3, 4 e 5, Figuras 7.33 a 7.35), uma possível e mais sofisticada abordagem é sugerida, mas não implementada nesta pesquisa. A sugestão considera a vegetação e o solo como duas regiões distintas e anisotrópicas, que possuem volume, ou seja, espessura, parâmetros físicos e hidráulicos e CCSA próprias, diferentemente da abordagem utilizada, que só implementou a modificação na condição de fronteira (inclusão do tempo de interceptação) do modelo numérico.

A abordagem sugerida, apesar de possuir um maior número de dados de entrada, em especial à anisotropia de cada região (diferentes condutividades hidráulicas saturadas vertical e horizontal já considerando a direção de rotação imposta pelo SC), possibilita incorporar e simular a entrada e a redistribuição da água armazenada pela vegetação em diferentes tempos e velocidades a partir da modificação das condutividades hidráulicas vertical e horizontal, de forma a melhor representar os resultados do modelo físico para a região que contém as raízes da espécie gramínea utilizada.

Nessa abordagem numérica, o armazenamento de água proporcionado pela cobertura vegetativa é função de sua espessura, e equivale à altura de interceptação, contando que a porosidade desta região seja 100%, ou seja, todo o volume de vazios está disponível para o armazenamento de água e posterior redistribuição.

Com relação a retenção de água pela cobertura vegetativa, governado principalmente pelo valor de entrada de ar, não determinado para esse material heterogêneo (solo-ar-água-raízes da vegetação), este deve possuir um valor artificialmente elevado para essa abordagem, visto que,

a vegetação deve reter a água mantendo a condutividade hidráulica constante e sem queda para posteriormente, ser reajustada para contemplar a redistribuição de água evitando possíveis problemas de barreira capilar.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A PESQUISA

Este capítulo apresenta as considerações finais de toda a pesquisa desenvolvida. As principais conclusões sobre o desenvolvimento e a aplicação do modelo numérico que representa o modelo físico (simulador de chuva), considera as características das chuvas simuladas, o fluxo de água no solo não saturado com e sem vegetação e o escoamento superficial. O capítulo finaliza com sugestões para trabalhos futuros.

8.1 CONCLUSÕES

As conclusões aqui apresentadas foram desenvolvidas principalmente em relação aos objetivos propostos e apresentados no Capítulo 1.

A partir do modelo numérico desenvolvido para representação do modelo físico e interpretação dos resultados, conclui-se que ele possibilitou:

- melhor compreensão de como as variáveis e os fenômenos hidrológicos e geotécnicos se comportam frente aos diferentes cenários de entrada possíveis, principalmente no que diz respeito a diferentes intensidades de chuva, inclinação e condições iniciais das amostras ensaiadas;
- o subsídio da construção do modelo físico no que diz respeito as dimensões geométricas das amostras, levando em consideração o efeito escala, estabelecendo a espessura e o comprimento mínimo adequados evitando os efeitos das condições de contorno, sendo de grande importância para os resultados dos testes;
- o estabelecimento de diferentes definições para a interpretação do coeficiente de escoamento superficial (pontual, superficial e total), adequando as medições dos testes realizados em uma superfície e durante um intervalo de tempo para a concepção do simulador de chuvas;
- a percepção do efeito da espessura e do grau inicial de saturação das amostras, ou seja, a espessura afeta os tempos de equilíbrio como resultado de caminhos de movimento de umidade mais longos. Já o grau inicial de saturação, por outro lado, controla a condutividade hidráulica insaturada inicial e média. Amostras maiores e mais secas exigem tempos de equilíbrio significativamente mais altos;
- o entendimento de que, ainda sobre o tempo de equilíbrio, materiais com menor grau de saturação e com menor permeabilidade média requerem um período mais longo para atingir o equilíbrio;

- estabelecer um tempo de equilíbrio de 48 h para todas as espessuras de amostra e graus iniciais de saturação analisados neste trabalho, considerando o tempo de equilíbrio como o tempo em que a diferença entre a carga hidráulica na parte inferior e no topo da amostra é menor que 0,01%;

- a compreensão de que, para a maioria das condições de teste típicas, considerando as características usuais do campo ($S_i \leq 75\%$), não haveria interferência dos processos de redistribuição de água devido à inclinação da amostra por um período de uma hora. No entanto, o fluxo de umidade produzido ao inclinar as amostras sem o efeito da chuva mostrou que pode afetar potencialmente os resultados do escoamento para solos com baixo valor de entrada de ar, ou seja, as condições de teste para esses tipos de solo devem ser consideradas com maior cuidado e podem exigir que as aplicações de chuva sejam limitadas a um período de tempo mais curto, como 30 min;

- a identificação de três estágios do mecanismo de escoamento no simulador de chuva (SC), com significado físico claro, apresentando valor de escoamento superficial do ponto central das amostras aproximadamente igual ao valor médio obtido a partir dos dois pontos das bordas superiores. Como resultado, o escoamento superficial total obtido pela coleta do escoamento pontual produzido em toda a superfície é representativo das condições médias da amostra;

- a satisfatoriedade dos erros numéricos, considerando que o processo de calibração foram satisfatórios. Isso indicou índice de erro RMSE máximo de 0,11 para a modelagem sem levarem conta o efeito da cobertura vegetativa e de 0,47, considerando a cobertura vegetativa da espécie *Paspalum notatum*. Obviamente os erros aumentaram ao simular o comportamento vegetativo devido à complexidade que incorpora ao sistema. Porém, os resultados são promissores visto que, o único dado de entrada necessário para a modelagem da interceptação é de fácil obtenção a partir da instrumentação adotada. Ela também representa simplificada bem a compreensão do fenômeno, possibilitando futuras adequações de maior complexidade ao modelo numérico desenvolvido em busca de melhor fidedignidade física;

- a obtenção de dados de interceptação para uma espécie gramínea (*Paspalum notatum*) muito utilizada em obras civis (hídricas e geotécnicas) e na agronomia, girando em torno de 8,0 mm para chuvas de intensidades pluviométricas de até 86,0 mm h⁻¹, inclinações menores que 15° e altura da gramínea de 30 cm;

- a utilização da gramínea *Paspalum notatum* que evitou: a geração de escoamento superficial total, os processos erosivos devido ao escoamento superficial e à alta energia cinética das gotas de chuvas simuladas, o efeito salpico e carreamento de partículas do solo para chuvas de intensidades simuladas de 86,0 mm h⁻¹.

Sobre o desenvolvimento e a construção do modelo físico (simulador de chuvas) para aplicação na prática hidrológica e geotécnica, conclui-se que:

- a geração de chuvas simuladas foi possibilitada a qualquer tempo com características próximas às chuvas naturais como: uniformidade, apresentando CUC maiores que 70%; distribuição do tamanho de gotas de chuvas, ou seja, número maior de produção de gotas de chuvas entre 2,0 e 2,5 mm; intensidade pluviométrica entre 86,0 a 220,0 mm h⁻¹; velocidade e energia cinética potencialmente maiores que as produzidas por chuvas naturais (150%) para avaliação do solo não saturado com e sem cobertura vegetativa;

- com relação ao módulo estrutural, ele não apresentou nenhum desempenho insatisfatório do tipo empenos, deformações, movimentações e vibrações excessivas nas fases de montagem, utilização, inclinação das amostras e desmontagem. Por outro lado, indicou excelente desempenho estrutural;

- o módulo geração de chuvas, utilizando-se de sistema de controle da pressão de serviço da rede hidráulica para a produção das chuvas simuladas do tipo PID em Arduíno controlado por aplicativo via *bluetooth*, garantiu menor interferência proveniente de ajustes manuais e maior qualidade (controle da pressão de serviço da rede hidráulica) para com as características das chuvas simuladas, sejam elas contínuas ou pulsadas ao longo do tempo;

- adequado planejamento, posicionamento, quantidade e locação dos sensores utilizados (umidade e tensiômetros), ou seja, módulo monitoramento, foram imprescindíveis para a calibração do modelo numérico, considerando o solo com e sem cobertura vegetativa para posterior entendimento dos fenômenos de infiltração e interceptação;

- além das áreas envolvidas nesta pesquisa (precipitação, interceptação, infiltração, escoamento superficial e fluxo em solos não saturados), a utilização do simulador de chuvas desenvolvido pode ser estendida para pesquisas que envolvam temas sobre erodibilidade, transporte de contaminantes, utilização de geossintéticos e geomembranas aplicadas aos solos, pavimentos permeáveis, qualidade da água, além de envolver instrumentação, eletroeletrônica e automação, utilizando-se de amostras com dimensões de até 1,0 m²;

- na maioria, os resultados experimentais realizados no simulador de chuva indicaram que o escoamento superficial é influenciado principalmente pela espessura, umidade inicial e cobertura das amostras, sendo menos significativa a influência do comprimento e baixas declividades.

Por fim, o diferencial desta pesquisa está no avançado grau de detalhamento sobre projeto, construção e uso de um simulador de chuva para fins hidrológicos e geotécnicos com o monitoramento real das poropressões, sucções e umidade das amostras de solo antes e após ensaios de precipitação, além de, apresentar toda a metodologia de preparação de amostras compactadas com e sem vegetação, procedimentos de ensaios, calibração e desenvolvimento de importante ferramenta numérica (modelo), utilizando o *software* FlexPDE, capaz de considerar e representar adequadamente os fenômenos físicos envolvidos, apresentando baixo índice de erros para os diferentes cenários calibrados ($RMSE < 0,11$) para solo sem vegetação, além de possibilitar o universo de aplicação para outras áreas, processos ou temas de interesse, como os ambientais.

8.2 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como o objetivo de sofisticar e aperfeiçoar o modelo físico e numérico desenvolvido e implementado nessa pesquisa, são propostas as seguintes recomendações:

- incorporar o efeito de anisotropia do solo no que diz respeito à condutividade hidráulica saturada vertical e horizontal com e sem vegetação *Paspalum notatum*;
- determinar experimentalmente a condutividade hidráulica saturada horizontal e curva característica solo-água contemplando amostras deformadas e indeformadas com a presença de raízes da vegetação *Paspalum notatum* para subsidiar os dados de entrada do modelo numérico com incorporação de anisotropia do solo;
- contemplar a infiltração pontual a jusante, I_P , para diferentes inclinações, α_D , para avaliar a influência no escoamento superficial pontual, R_P , e total, R_T . Com relação ao escoamento superficial pontual, R_P , ele corresponde a água que não infiltrou nesse ponto, I_P , e que escoou por cima da superfície podendo infiltrar nos pontos jusantes, não contemplados nesta pesquisa;
- levar em conta o efeito das raízes para maiores profundidades do perfil de solo ensaiado (15 a 30 cm) nos processos de infiltração e escoamento superficial para compreensão das mudanças de poropressões e sucções das amostras;

- realizar ensaios experimentais no SC com altura de aplicação de chuvas simuladas maiores que 1,89 m com a intenção de que as gotas de chuva de diferentes diâmetros produzidos consigam atingir a velocidade terminal e, conseqüentemente, energia cinética não superior as chuvas naturais para avaliar a influência nos processos de infiltração, escoamento superficial e erodibilidade;
- realizar ensaios experimentais no SC considerando inclinações das amostras, α , maiores que 15°, ou seja, 30 e 45° para avaliar efeitos da infiltração e escoamento superficial no perfil de solo ensaiado;
- ensaiar amostras preparadas com o mesmo solo utilizando outro tipo de vegetação do tipo gramínea, como a *Axonopus compressus*, conhecida como grama São Carlos, para avaliar as possíveis mudanças na interceptação, infiltração, escoamento superficial e poropressões comparadas com os resultados apresentados pela cobertura vegetativa utilizada (gramínea *Paspalum notatum*);
- avaliar diferentes intensidades de chuvas simuladas em amostras desse mesmo solo com a cobertura vegetativa do tipo gramínea *Axonopus compressus* (grama São Carlos) para acompanhar o comportamento da manutenção das sucções.

REFERÊNCIAS

- ASCE - American Society of Civil Engineers. (1969). Design and Construction of sanitary and storm sewers. Manuals and Reports of Engineering Practice, 37, New York.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2008). NBR 6.591: Tubos de aço-carbono com solda longitudinal de seção circular, quadrada, retangular e especial para fins industriais – Especificação. Rio de Janeiro, RJ, 10 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR NM 52: Agregados – Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente. Rio de Janeiro, RJ, 6 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). NBR 14.105-1 - Medidores de pressão - Parte 1: Medidores analógicos de pressão com sensor de elemento elástico - Requisitos de fabricação, classificação, ensaios e utilização. Rio de Janeiro, RJ, p. 40.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 9.604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 9 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016a). NBR 7.182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, RJ, 9 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). NBR 6.508: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Versão corrigida 2:2017. Rio de Janeiro, RJ, 10 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). NBR 7.181: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 12 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). NBR 8.261: Tubos de aço-carbono, formado a frio, com e sem solda, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais - Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 10 p.
- Abramson, L., Thomas, L., Sunil, S.; Glenn, B. (2002). Slope Stability and Stabilization Methods. Second. John Wiley & Sons, Inc., USA, 712 p.
- Abudi, I.; Carmi, G.; Berliner, P. (2012). Rainfall simulator for field runoff studies. Journal of Hydrology, 454-455, p. 76–81.
- Adekalu, K. O.; Olorunfemi, I. A.; Osunbitan, J. A. (2007). Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria, Bioresour. Technol., 98, p. 912–917.
- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. Eng. Geol., 73(3-4): p. 247–265.
- Alves Sobrinho, T. (1997). Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil. Viçosa: UFV, Tese Doutorado, 85 p.
- Alves Sobrinho, T.; Macpherson, H. G.; Gómez, J. A. (2008). A portable integrated rainfall and overland flow simulator. Soil Use Management, v. 24, p. 163-170.
- Amimoto, P. Y. (1981). Erosion and sediment control handbook, California Department of Conservation Report No. EPA 4 40/3-78-003, 197 p.
- Arnaez, J.; Lasanta, T.; Ruiz-Flaño, P.; Ortigosa, L. (2007). Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. Soil Tillage Res., 93, p. 324–334.
- Araújo, A. G. (2013). Análise do Desempenho de Poços de Infiltração na Cidade de Goiânia. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 113 p.
- Araújo, A. G. (2019). Uso de microtomografia e porosimetria para análise da estrutura bimodal de um latossolo vermelho reconstituído. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.

- Assouline, S.; El Idrissi, A.; Persoons, E. (1997). Modeling the physical characteristics of simulated rainfall: a comparison with natural rainfall. *J. Hydrol.* 196, 336–347.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (2015). D6459 – 15 Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product Performance in Protecting Hill Slopes from Rainfall-Induced Erosion.
- Balascio, C. C. (2001). Multiquadric Equations and Optimal Areal Rainfall Estimation. *Journal of Hydrologic Engineering*, v 6, n 1, p. 498-518.
- Barbalho, F. D.; Vilela, L. D. F.; Formiga, K. T. M. (2007). Avaliação do modelo multiquadric para obtenção do valor da chuva média de uma bacia hidrográfica. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19 p.
- Basett, D. J.; Brodie, A. F. (1961). A study of Matabitchual varved clay. *Ontario Hydro Research News*, 13(4), 1-6.
- Bastin, G.; Lorent, B.; Duqué, C.; Gevers, M. (1984). Optimal estimation of the average rainfall and optimal selection of rain gauge locations. *Water Resources Research*, v 20, n 4, p. 463-470.
- Beard, K. V.; Pruppacher, H. R. (1969). A determination of the terminal velocity and drag of small water drops by means of a wind tunnel. *Journal of Atmospheric Sciences* 26, p. 1066-1072.
- Beard, K. V.; Chuang, C. (1987). A new model for the equilibrium shape of raindrops. *Journal of the Atmospheric sciences*, 44(11), p. 1509-1524.
- Beasley, D. B.; Huggins, L. H.; Monke, E. J. (1980). ANSWERS: A model for watershed planning. *Trans. ASAE* 23:938–944. doi:10.13031/2013.34692.
- Bentley, W.A. (1940). Studies of raindrops and raindrop phenomena. *Mon. Weather Rev.*, 32, p. 450–456.
- Bernardo, S. (2008). Manual de Irrigação. 8. ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária.
- Blanquies, J.; Scharff, M.; Hallock, B. (2003). The design and construction of a rainfall simulator. In: IECA, 34th Annual conference and Expo., Las Vegas, Nevada, p. 24–28.
- Borrell, V. E.; Dartus, D.; Alquier, M. (2007). Forecasting flash floods in ungauged basins with satellite data. In: D. Schertzer et al., editors, Predictions in ungauged basins: Proceedings of the PUB Kick-off Meeting, Brasilia. 20-22 Nov. 2002. IAHS Publ. 309. Int. Assoc. Hydrol. Sci., Wallingford, UK.
- Bourouai, F.; Dillaha, T. A. (1996). ANSWERS-2000: Runoff and sediment transport model. *J. Environ. Eng.* 122:493–502.
- Brodie, I.; Rosewell, C. (2007). Theoretical Relationships Between Rainfall Intensity and Kinetic Energy Variants Associated with Stormwater Particle Washoff. *Journal of Hydrology*, n.340, 30/03/2007, p. 40-47.
- Brooks, R. H.; Corey, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, EUA*, (3): p. 1-27.
- Burdine, N. T. (1953). Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Journal of Petroleum Technology*, v. 5, i. 3, p. 71-78. doi: 10.2118/255-G.
- Carvalho, M. F.; Tarqui, J. L. Z.; Silva, V. S.; Lobo, B. R. da H. (2012). Avaliação do Funcionamento de um Simulador de Chuva Pelo Método da Farinha. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Volume 17, n.3, p. 115-124.
- Casagrande, L.; Poulos, S. (1969). On the effectiveness of sand drains. *Canadian Geotechnical Journal*, 6(3), 287-326.
- Castro, T. Q. (2011). Avaliação de desempenho de pavimentos permeáveis. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- Cavalcante, A. L. B.; Zornberg, J. G. (2017a). Efficient approach to solving transient unsaturated flow problems. I: Analytical solutions. *Int. J. Geomech.*, 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000875, 04017013, 17 p.

- Cavalcante, A. L. B.; Zornberg, J. G. (2017b). Efficient approach to solving transient unsaturated flow problems. II: Numerical solutions. *Int. J. Geomech.*, 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000876, 04017014, 13 p.
- Cecconi, M; Pane, V; Napoli, P. & Cattoni, E. (2012). Deep roots planting for surface slope protection. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 17U: 2809–2820.
- Cecconi, M; Napoli, P.; Pane, V. (2014). Effects of soil vegetation on shallow slope instability. *Environmental Geotechnics*. v. 02, issue EG3. p. 130–136 <http://dx.doi.org/10.1680/envgeo.13.00110>.
- Cecconi, M.; Napoli, P.; Pane, V. (2015). Effects of soil vegetation on shallow slope instability. *Environmental Geotechnics* 2 (3), p. 130-136.
- Celia, M. A.; Bouloutas, E. T.; Zarba, R. L. (1990). A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water resources research* 26 (7), p. 1483-1496.
- Cerdá, A.; Ibáñez, S.; Calvo, (1997). A. Design and Operation of a Small and Portable Rainfall Simulator for Rugged Terrain. *Soil Technology*. 11, p. 163-170.
- Cerdan, O.; Bissonnais, Y. L.; Souchere, P. M.; Lecomte, V. (2002). Sediment concentration in interrill flow: interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall, *Earth Surf. Proc. Land.*, 27, p. 193–205.
- Cerdan, O.; Bissonnais, Y. L.; Govers, G.; Lecomte, V.; Oost, K.V. (2004). Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy. *J. Hydrol.* 299:4–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.02.017>.
- Chan, H. T.; Kenney, T. C. (1973). Laboratory investigation of permeability ratio of New Liskeard varved soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 10(3), 453-472.
- Choupas, M. (1995). *Hidrologie – Retablissement des Petits Ecoulements Naturels*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Chow, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Chowdhury, R., Flentje, P.; Bhattacharya, G. (2010). *Geotechnical Slope Analysis*. Taylor & Francis Group, London, UK, 737 p.
- Christiansen, J. P. (1942). *Irrigation by sprinkling*. Berkeley: University of California, Agricultural Experiment Station. 124 p. Bulletin n. 670.
- Costa, C. M. C. (2015). *Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-108/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 163 p.
- Costa, A. R.; Prado, L. A. (2003). Espacialização de Chuvas Intensas para o Estado de Goiás e o Sul de Tocantins. *Revista de Engenharia Agrícola*, v.23, n.2, p. 268-276.
- Coppin, N. J.; Richards, I. G. (Eds.). (2007). *CIRIA: Use of vegetation in civil engineering* (pp. 23-36). London: Construction Industry Research and Information Association.
- Crosta, G. (1998). Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. *Environ. Geol.*, 35(2-3): p. 131–145.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la Ville de Dijon*. Dalmont, Paris.
- Das, B. M; Sobhan, K. (2014). *Fundamentos de engenharia geotécnica*. 8º Tradução da edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning.
- de Araújo, P. R., Tucci, C. E., Goldenfum, J. A., (2000). Avaliação da Eficiência dos Pavimentos Permeáveis na Redução de Escoamento Superficial. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v 5, p. 21 - 29.
- Decagon Devices INC. (2008). *Soil Moisture Sensors: User’s Manual*, version 8. Pullman WA 99163 USA, Decagon Device INC.
- de Jong, S. (2010). *Low Cost Disdrometer*. Masters Thesis, Delf University of Technology, Delft, The Netherlands.

- Delmas, M.; Pak, L. T.; Cerdan, O.; Souchère, V.; Bissonais, Y. L.; Couturier, A.; Sorel, L. (2012). Erosion and sediment budget across scale: a case study in a catchment of the European loess belt. *Journal of Hydrology*. 420–421:255–263. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.008>.
- de Roo, A. P. J.; Wesseling, C. G.; Ritsema, C. J. (1996). LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins: I. Theory, input and output. *Hydrol. Processes* 10:1107–1117. doi:10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1107::AID-HYP415>3.0.CO;2-4.
- Dingman, S. L. (2015). *Physical Hydrology - Third Edition*. Long Grove, Illinois. Waveland Press, Inc., 657 p.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. (2009). *Manual de vegetação rodoviária - volume 1: Implantação e Recuperação de Revestimentos Vegetais Rodoviários*. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, IPR. Publ., 734 p.
- Dunne, T.; Black, R. D. (1970). An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resour. Res.*, 6(2): 478–490.
- Dunkeley, D. (2008). Rain Evet Properties in Nature and in Rainfall Simulation Experiments: a Comparative Review Recommendations for Increasingly Systematic Study and Reporting. *Hydrological processes*. 22, p. 4415 - 4435.
- Egeli, I.; Pulat, H. F. (2011). Mechanism and modelling of shallow soil slope stability during high intensity and short duration rainfall. *Scientia Iranica. Res.*, 18(6): 1179-1187.
- Egodawatta, P. (2007). *Translation os Small-plot Scale Pollutant Build-up and Wash-off Measurements to Urban Catchment Scale*. (Doctor of Philosophy). Faculty of built environment and engineering, Queensland University of Technology, Queensland, 295p.
- Egodawatta, P.; Thomas, E.; Goonetilleke, A. (2007). *Mathematical Interpretation of Pollutant Wash-off from Urban Road Surfaces Using Simulated Rainfall*. *Water Research*, 41 (13), 3025 – 3031.
- Egodawatta, P.; Thomas, E.; Goonetilleke, A. (2009). Understanding the Physical Processes of Pollutant Build-up and Wash-off on Roofs Surfaces. *Science of the Total Environment*, 407 (6), p. 1834 – 1841.
- Eigel, J. D.; Moore, I. D. (1983). A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, v.26, n.4, p.1079-1084.
- Fatahi, B. (2007). *Modelling of influence of matric suction induced by native vegetation on sub-soil improvement*, PhD thesis, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong. <http://ro.uow.edu.au/theses/781>.
- Feldman, A. D. (1995). HEC-1 flood routing package. In: *Computer models of watershed hydrology*. Water Resour. Publ., Highlands Ranch, CO, p. 119–150.
- FHA - Federal Highway Administration. (2011). *US Department of Transportation New Jersey Avenue*, 1200, SE, Washington, DC 20590.
- Franch, F. A. J. P. (2008). *Influência do tipo de revestimento superficial no fluxo não saturado e sua influência na estabilidade de taludes*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-26092008-093650/>.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H.; Rahardjo, Hendry. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. G.; Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, p. 521-532. doi: 10.1139/t94-061.
- Fredlund, D. G.; Xing, A.; Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, p. 533-546. doi: 10.1139/t94-062.

- Fredlund, D.G. (2006). Unsaturated soil mechanics in engineering practice, The 2005 Terzaghi Lecture: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(3): 286-321.
- Fredlund, D.G.; Rahardjo, H. (2012). *Unsaturated soil mechanics*. John Wiley & Sons, Nova Jersey, EUA, 926 p.
- French, R.; Pilgrim, D. H.; Laurenson, E. M. (1974). Experimental examination of the rational method for small rural catchments. *Civil Engineering Transactions of the Institution of Engineers, Australia*, CE16(2), 95–102.
- Fu, Z.; Li, Z.; Cai C.; Shi, Z.; Xu, Q.; Wang, X. (2011). Soil thickness effect on hydrological and erosion characteristics under sloping lands: A hydrogeological perspective. *Geoderma* 167-168, p. 41–53. doi:10.1016/j.geoderma.2011.08.013.
- Fukui, Y; Nakanish, K; Okamura, S. (1980). Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity. *Irrig. Sci.*, vol 2, p. 23-32.
- Garcez, L. N. (1967). *Hidrologia*. Editora Edgard Blücher Ltda, Editora da Universidade de São Paulo, 249 p., São Paulo.
- GeoSlope International Ltda. (2007). *Vadose/W, GeoStudio 2007*. GeoSlope International Ltd, Calgary, Alberta, Canada.
- Gitirana Jr., G. F. N.; Fredlund, D. G. (2004). Soil-water characteristic curve equation with independent properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130 (2): 209-212.
- Gitirana Jr., G. de F.N. (2005). Weather-related geo-hazard assessment model for railway embankment stability. PhD. Thesis, University of Saskatchewan, Canada, 439 p.
- Gitirana Jr, G. F. N; Marinho, F. A. M; Soto, M. A. A. (2015). In: Solos não saturados no contexto geotécnico. José Camapum de Carvalho ... [et.al.] orgs: Camapum, J. C; Gitirana Jr, G. F. N; Machado, S. L.; Mascarenha, M. M. A.; Filho, F. C. S. São Paulo : Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, p. 759.
- Gomi, T.; Sidle, R. C.; Miyata, S.; Kosugi, K. (2008). Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: scale effects and runoff transfer. *Water Resour. Res.* 44:1–16. <http://dx.doi.org/10.1029/2007WR005894>.
- Green, H. W.; Ampt, G. A. (1911). Studies of soil physics. Part I – The flow of air and water through soils, *J. Agric. Sci.*, 4(01): 1–24. doi:10.1017/S0021859600001441.
- Herngren, L.; Goonetilleke, A.; Ayoko, G. (2004). Investigation of Urban Water Quality Using Artificial Rainfall. Proceedings of the international Conference: Watershed. Dearborn, Michigan: CD rom publication.
- Herngren, L. F. (2005). Build-up and Wash-off Process Kinetics of PAHs and Heavy Metals on Paved Surfaces Using Simulated Rainfall. Ph.D. Thesis, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia.
- Herngren, L. A.; Goonetilleke, R.; Sukpum, D.Y. de Silva. (2005). Rainfall Simulation as a Tool for Urban Water Quality Research. *Environmental Engineering Science*. 22: p. 378-383.
- Hipólito, J. R.; Vaz, J. R. (2013). *Hidrologia e recursos hídricos*, 2º edição. Instituto Superior Técnico (IFT). IST Press. Lisboa, Portugal, p. 796.
- Holtan, H.N. (1961). A concept of infiltration estimates in watershed engineering. ARS 41-51. USDA–ARS, Washington, DC.
- Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 14 (1), 446-460.
- Horton, R.E. (1941). An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 5:399–417. doi:10.2136/sssaj1941.036159950005000C0075x.

- Hotchkiss, R. H.; Provaznik, M. K. (1995). Observations on the rational method *C* value. *Watershed management: Planning for the 21st century*, T. J. Ward, ed., ASCE, New York, p. 21–26.
- Hudson, N. W. (1963). Raindrop size distribution in high intensity storms. *Rhodesian Journal of Agricultural Research*, vol. 1, p. 6-11.
- Hudson, N. W. (1964). The flour pellet method for measuring the size of raindrops, Department of conservation, Research Bulletin, Salisbury, n.4, p. 26.
- Hutchinson, P.; Walley, W.J. (1972). Calculation of areal rainfall using finite element techniques with altitudinal corrections. *International Association of Hydrological Sciences Bulletin*, v 17, n 3, p. 259-272.
- Jordán, A.; Zavala, L. M.; Gil, J. (2010). Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain, *Catena*, 81, 77–85.
- Joss, J.; Waldvogel, A. (1967). Ein spektrograph für niederschlagstropfen mit automatischer auswertung. *Pure Appl. Geophys.*, 68, 240–246.
- Joss, J.; Waldvogel, A. (1969). Raindrop size distribution and sampling size errors. *Journal of the Atmospheric Sciences*, p. 566-569.
- Joss, J.; Waldvogel, A. (1977). Comments on some observations on Joss–Waldvogel rainfall disdromete. Reply. *J. Appl. Meteorol.*, 16, p. 112–113.
- Kathiravelu, G.; Lucke, T.; Nichols, P. (2016). Rain Drop Measurement Techniques: A Review. *Journal Water*, 8, 29, p. 20. doi:10.3390/w8010029, www.mdpi.com/journal/water.
- Kenney, T. C.; Chan, H. T. (1973). Field Investigation of Permeability Ratio of New Liskeard Varved Soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 10(3), 473-488.
- Kidron, G.J. (2011). Runoff generation and sediment yield on homogeneous dune slopes: scale effect and implications for analysis. *Earth Surf. Process. Landf.* 1824: 1809–1824. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.2203>.
- Kim, J., Jeong, S., Park, S. & Sharma, J. (2004). Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. *Eng. Geol.*, 75(3-4): 251–262.
- Kim, H.; Ko, T.; Jeong, H.; Ye, S. (2018). The development of a methodology for calibrating a large-scale laboratory rainfall simulator. *Atmosphere* 9 (11), 427.
- Kincaid, D.C.; Solomon, K. H.; Oliphant, J. C. (1996). Drop size distributions for irrigation sprinkler. *Transactions of the ASAE*, v. 39, n. 3, p. 839-845.
- Kinnell, P.I.A. (1972). The acoustic measurement of water-drop impacts. *J. Appl. Meteorol.*, 11, p. 691–694.
- Kinnell, P.I.A. (1976). Some observations on the Joss-Waldvogel rainfall disdrometer. *J. Appl. Meteorol.*, 15, p. 499–502.
- Kinnell, P.I.A. (1977). Some observations on Joss-Waldvogel rainfall disdrometer-reply. *J. Appl. Meteorol.*, 16, 113–114.
- Kostiakov, A.N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from dynamic point of view for purposes of amelioration. *Trans. 6th Committee of International Society of Soil Science, Russia*, A15–21.
- Kouwen, N. (2012). WATFLOOD/WATROUTE hydrological model routing and flow forecasting system. Dep. of Civil Engineering, Univ. of Waterloo, Waterloo, ON, Canada.
- Kühn, V. O. (2014). Resistência ao cisalhamento de um solo tropical não saturado considerando altas succões. 194 p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- Laflen, J. M.; Lane, L. J.; Foster, G. R. (1991). WEPP: A new generation of erosion prediction technology. *J. Soil Water Conserv.* 46:34–38.
- Laguna, M. A. A. (2015). Comportamento hidromecânico de um solo argiloso compactado em diferentes umidades. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, p. 96.

- Langhans, C.; Diels, J.; Clymans, W.; Van den Putte, A.; Govers, G. (2019). Scale effects of runoff generation under reduced and conventional tillage. *CATENA* 176, p. 1-13.
- Lanzinger, E.; Theel, M.; Windolph, H. (2006). Rainfall amount and intensity measured by the Thies laser precipitation monitor. In: Instruments and Observing Method Report No. 94, 1–97, Proceedings of TECO-2006-WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation, World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland.
- Lascelles, B.; Favis-Mortlock, D.; Parsons, A. J.; Guerra, A. J. T. (2000). Spatital and Temporal Variation in Two Rainfall Simulators: Implications for Spatitally Explicit Rainfall Simulation Experiments. *Earth Surface Process and Landforms*. 25, p. 709 - 721.
- Legates, D. R.; McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Res.* 35(1): p. 233-241.
- Leong, E.C.; He.; L.; Rahardjo, H. (2002). Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. *Journal Geotechnical Testing*, v. 25, n° 3.
- Leung, A. K.; Garg, A. & Ng, C. W. W. (2015). Effects of plant roots on soil–water retention and induced suction in vegetated soil. *Eng. Geol.* 193, 183–197.
- Li, J.; Kawano, H. (1995). Simulating water-drop movement from noncircular sprinkler nozzles. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.121, n.2, p.152-158.
- Liu, Y. J.; Wang, T. W.; Cai, C. F.; Li, Z. X. & Cheng, D. B. (2014). Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Science of the total environment*. vol:485-486, p. 93 -102.
- Liu, Y.; Xin, Y.; Xie, Y.; Wang, W. (2019). Effects of slope and rainfall intensity on runoff and soil erosion from furrow diking under simulated rainfall. *CATENA* 177, p. 92-100.
- Lowe, E. J. (1892). Rain drops. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 18, 242–245.
- Lu, N.; Likos, J. (2004). Sate of unsaturated soil. *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc, p. 3-46.
- Lumb, P. (1975). Slope failures in Hong Kong. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 8(1): 31–65.
- Lumb, P.; Holt, J. K. (1968). The undrained shear strength of a soft marine clay from Hong Kong. *Geotechnique*, 18(1), 25-36.
- Machado, S. L.; Vilar, O. M. (2015). Potenciais de água no solo. Solos não saturados no contexto geotécnico. J. Camapum de Carvalho; G. F.N. Gitirana Jr.; S. L. Machado; M. M. A. Mascarenhas; F. C. Silva Filho (eds.), ABMS, São Paulo, SP, p. 79-96.
- Manley, R. E. (1993). HYSIM reference manual. R.E. Manley Consultancy, Cambridge, UK.
- Marshall, J. S.; Palmer, W. M. K. (1948). The distribution of raindrops with size. *J. Meteorol.*, 5, 165–166.
- Marshall, J. S.; Langille, R. C.; Palmer, W. M. K. (1947). Measurement of rainfall by radar. *J. Meteorol.*, 4, 186–192.
- Martinez, G.; Wertz, M.; Pierson, F. B.; Spaeth, K. E.; Pachepsky, Y. (2017). Scale effects on runoff and soil erosion in rangelands: Observations and estimations with predictors of different availability. *Catena*, 151, p. 161-173.
- Mello, A. J. Q. (1973). Rios e Chuvas do Brasil: Novos métodos e tabelas de hidrologia, Edição do Autor, Impresso Editora A M. Cavalcante Cia Ltda, Curitiba, Paraná.
- Mend (Mine Environment Neutral Drainage) Report 2.21.6. (2014). Modelling the critical interactions between cover systems and vegetation. O’Kane Consultants Inc. Integrated Geotechnical Engineering Services Specialists in Unsaturated Zone Hydrology. OKC report n° 702-03.
- Mendes, T. A. (2008). Avaliação da Vulnerabilidade de Barramentos ao Rompimento de pequenos barramentos localizados a montante. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, p. 105.

- Mendes, T. A.; Gitirana JR., G. F. N.; Rebolledo, J. F. R.; Vaz, E. F.; da Luz, M. P. (2020). Numerical evaluation of laboratory apparatuses for the study of runoff. *Brazilian Journal of Water Resources – RBRH*, 25 (no prelo).
- Meyer, L. D.; Harmon, W. C. (1978). Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on roe sideslopes. *ASAE* 77, 100–104.
- Meyer, L. D.; Mccune, D. L. (1958). Rainfall simulator for runoff plots. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, v.39, n.1, p. 644-648.
- Miguntanna, N. S. (2009). Determining a Set of Surrogate Parameters to Evaluate Urban Stormwater Quality. Faculty of Built Environment and Engineering Msc Thesis, Queensland University of Technology, Australia, 229 p.
- Miller, W. P. (1987). A solenoid-operated, variable intensity rainfall simulator. *Soil Sci. Am. J.* 51, 832–834.
- Miller, D.J.; Nelson, J.D. (2006). Osmotic Suction in Unsaturated Soil Mechanics. In G.A. Miller; C.E. Zapata; S.L. Houston; D. G. Fredlund (Eds.), 4 Int. Conference on Unsaturated Soils, ASCE Geotechnical Special Publication No. 147, p. 1382-1393. ASCE.
- Mingguo, Z.; Qiangguo, C.; Hao, C. (2007). Effect of vegetation on runoff-sediment yield relationship at different spatial scales in hilly areas of the Loess Plateau, North China, *Ac. Ecol. Sin.*, 27, 3572–3581.
- Miyazaki, T. (2005). *Water Flow in Soils*, Second Edition. CRC Press Taylor & Francis Group, 440 p.
- Montebeller, C. A.; Carvalho, D. F.; Sobrinho, T. A.; Nunes, A. C. S.; Rubio, E. (2001). Avaliação de um Simulador de Chuvas Pendular. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 5: p. 1-5.
- Montoya-Dominguez, J. D.; Garcia-Aristizábal, E. F.; Vega-Posada, C. A. (2017). One-dimensional experimental study of rainfall infiltration into unsaturated soil. *Revista Facultad de Ingenieria, Universidad de Antioquia*, n82, p. 74-81.
- Montrasio, L.; Schilirò L.; Terrone, A. (2016). Physical and numerical modelling of shallow landslides. *Landslides*. doi: 10.1007/s10346-015-0642-x.
- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), p. 885-900.
- Morin, J.; Goldberg, D.; Seginer, I. (1967). A rainfall simulator with a rotating disk. *Transacions of the ASAE*, St. Joseph, v.10, p. 74-79.
- Mualen, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v. 12, i. 3, p. 513-522. doi: 10.1029/WR0123i003p00513.
- Muñoz-Hoyos, E. (2014). Influência dos Parâmetros Hidrológicos e Geotécnicos na Estabilidade de Taludes. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-244/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 106 p.
- Ng, C. W. W.; Leung, A. K. & Woon, K. X. (2014). Effect of soil density on grass-induced suction distributions in compacted soil subjected to rainfall. *Can. Geotech. J.* 51, No. 3, p. 311-321.
- Ng, C. W. W.; Liu, H. W. & Feng, S. (2015a). Analytical solutions for calculating pore water pressure in an infinite unsaturated slope with different root architectures. *Can. Geotech. J.* 52, No. 12, p. 1981-1992.
- Ng, C. W. W.; Kamchoom, V. & Leung, A. K. (2015b). Centrifuge modelling of the effects of root geometries on the transpiration-induced suction and stability of vegetated slopes. *Landslides*, <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-015-0645-7>.

- Ng, C. W. W.; Ni, J. J.; Leung, A. K. & Wang, Z. J. (2016). A new and simple water retention modelo for root-permeated soils. *Geotechnique Letters* 6, 106–111, <http://dx.doi.org/10.1680/jgele.15.00187>, p. 113-118.
- Nise, N. S. (2017). *Engenharia de sistemas de controle - 7º edição*. Editora LTC, 772 p.
- Ogata, K. (2011). *Engenharia de controle moderno – 5º edição*. Editora Pearson, 824 p.
- PDE Solutions (2016). Inc. FlexPDE 7.12 - Reference Manual. Antioch, CA, USA.
- Pérez-Latorre, F. J.; Castro, L. de; Delgado, A. (2010). A comparison of Two Variable Intensity Rainfall Simulators for Runoff Studies. *Soil & Tillage Research*: p. 11-16.
- Philip, J. R. (1957a). The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.*, 83(3): 345–358. doi:10.1097/00010694-195705000-00002.
- Philip, J. R. (1957b). The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.* 84:257–264. doi:10.1097/00010694-195709000-00010.
- Pilgrim, D. H.; Cordery, I. (1993). Flood runoff. *Handbook of hydrology*, D. R. Maidment, ed., McGraw-Hill, New York.
- Pinto, N. L.; Holtz, A. C. T.; Martins, J. A.; Gomide, F. L. S. (1976). *Hidrologia básica*. 1.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 304 p.
- Poesen, J. W. A.; Lavee, H. (1991). Effects of size and incorporation of synthetic mulch on runoff and sediment yield from interrills in a laboratory study with simulated rainfall, *Soil Till. Res.*, 21, p. 209–223.
- Poesen, J.W.; Torri, D.; Bunte, K. (1994). Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review, *Catena*, 23, p. 141–66.
- Pulat, H. F. (2010). An experimental and analytical study of various soil slopes in laboratory conditions, M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Izmir Institute of Technology, Izmir, Turkey.
- Rahardjo, H.; Krisnanto, S.; Leong, E. C. (2016). Effectiveness of Capillary Barrier and Vegetative Slope Covers in Maintaining Soil Suction. *Soils and Rocks*, São Paulo, 39(1): 51-69.
- Rennó, C. D.; Soares, J. V. (2000). Modelos hidrológicos para gestão ambiental. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas. Ação "Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental". Relatório técnico parcial. São José dos Campos: INPE, 60 p.
- Ribeiro, B. T.; Magalhães, C. A. S.; Lima, J. M.; Silva, M. L. N. (2007). Calibração e uso de mini simulador de chuva para estudos de erosão e poluição do solo. In: *Boletim Técnico*, n. 77. Lavras: UFLA, p. 1-17.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*, 1(5):318-333.
- Richards, L. (1941). A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil Sci* 51 (5), 377-386.
- Rodriguez-Iturbe, I.; Porporato, A. (2004). *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems*. Cambridge University Press, USA, 478 p.
- Rodriguez-Iturbe, I., Porporato, A., Laio, F.; Ridolfi, L. (2001). Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress: i. scope and general outline. *Adv. Water Resour.*, 24: 695–705.
- Rodriguez-Iturbe, I., Porporato, A., Ridolfi, L., Isham, V.; Coxi, D.R. (1999). Probabilistic modelling of water balance at a point: the role of climate, soil and vegetation. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 455(1990): 3789–3805.
- Rojas, K. R. C. (2017). Estudo Dos Deslizamentos Superficiais Deflagrados Por Chuvas Implementando a Análise Não Saturada e Transiente em Escala Regional. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-291/2017, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90 p.

- Rossman, L. A. (2010). Storm water management model user's manual, Version 5.0. USEPA, National Risk Manage. Res. Lab., Cincinnati, OH.
- Römken, M. J. M.; Helming, K.; Prasad, S. N. (2001). Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. Elsevier, Catena (46), p 103–126.
- Rueda, O. A. (2008). Modelamiento de la Humedad del Suelo en la Región Cafetera de Colombia Bajo Diferentes Coberturas Vegetales. Master, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 104 p.
- Sadeghi, S. H. R.; Gholami, L.; Sharifi, E.; Khaledi Darvishan, A.; Homaei, M. (2015). Scale effect on runoff and soil loss control using rice straw mulch under laboratory conditions. Solid Earth, 6, p. 1–8. doi:10.5194/se-6-1-2015.
- Salles, C.; Poesen, J.; Sempere-Torres, D. (2002). Kinetic Energy of Rain and its Functional Relationship with Intensity. Journal of Hydrology, n.257, 23 de outubro de 2001, p. 256–270.
- Sanderson, M.; Ahmed, R. (1979). Pre-monsoon rainfall and its variability in Bangladesh: a trend surface analysis. International Association of Hydrological Sciences Bulletin, v 24, n 3, p. 277–287.
- Schaake, J. C.; Geyer, J. C.; Knapp, J. W. (1967). Experimental examination of the rational method. J. Hydr. Div., 93(6), 353–370.
- Schönhuber, M.; Lammer, G.; Randeu, W.L. (2008). The 2D-video-distrometer. In Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction; Springer: Berlin, Germany, p. 3–31.
- Şen, Z. (2008). Instantaneous Runoff Coefficient Variation and Peak Discharge Estimation Model. J. Hydrol. Eng., 13(4), p. 270–277.
- Shao, Q.; Baumgartl, T. (2014). Estimating input parameters for four infiltration models from basic soil, vegetation, and rainfall properties. Soil Science Society of America Journal, v. 78, n. 5, p. 1507–1521.
- Silva, G. B. L. (2006). Avaliação Experimental Sobre a Eficiência de Superfícies Permeáveis com Vistas ao Controle do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas. Tese de Doutorado em Tecnologia e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, 180 p.
- Silva Júnior, A. C. (2015). Abordagem Rítmica Probabilística Aplicada em Análises de Fluxo e Estabilidade. Tese de Doutorado. Publicação: G.TD-109/ 15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137 p.
- Silveira, A. L. L. (2005). Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, ABRH, vol. 10, n.º.1, jan/mar, Porto Alegre. p. 5–23.
- Simanton, J. R.; Osborn, H.B. (1979). Reciprocal distance estimate of point rainfall. Journal of Hydraulics Division, v 106, n HY07, p. 1242–1246.
- Singh, V. P. (1989). Hydrologic Systems: watershed Modelling. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall. 420 p.
- Singh, V. P.; Birsoy, Y. K. (1975). Comparison of methods of estimating mean areal rainfall. New Mexico State University, Las Cruces, NM. WRRRI Report 065, New Mexico Water Resources Research Institute.
- Singh, V. P. (1995). Watershed Modelling. In: V.P. Singh (editor). Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publication, Highlands Ranch, Colorado, United States.
- Singh, J.; H. V. Knapp; M. Demissie. (2004). Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey. Disponível em: www.sws.uiuc.edu/pubdoc/CR/ISWSCR2004-08.pdf. Acessado em: 10 agosto 2017.

- SKZ (2011). Erarbeitung und Verifizierung von Auswahlkriterien für geosynthetische Erosionsschutzsysteme. Schlussbericht des AiF-Projektes Nr. 15717 (Edited by Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum.V.), Würzburg, p. 160, (in German).
- Smets, T.; Poesen, J.; Bochet, E. (2008a). Impact of plot length on the effectiveness of different soil-surface covers in reducing runoff and soil loss by water, *Prog. Phys. Geogr.*, 32, 654–677.
- Smets, T.; Poesen, J.; Knapen, A. (2008b). Spatial scale effects on the effectiveness of organic mulches in reducing soil erosion by water, *Earth-Sci. Rev.*, 89, 1–12.
- Smith, R. E. (1976). Approximations for vertical infiltration rate patterns. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, v.19, n.3, p. 505-509.
- Spraying Systems Co®. (2008). Catálogo Industrial de Produtos, Catálogo 70M. São Bernardo do Campo, SP, 52 p.
- Sousa Júnior, S. F. (2011). Desenvolvimento e Avaliação de um Simulador de Chuva para Estudos Ambientais. Dissertação de Mestrado, UFG, Goiânia, GO, 195 p.
- Sousa Júnior, S. F., Mendes, T. A., Siqueira, E. Q. (2017). Development and calibration of a rainfall simulator for hydrological studies. *Brazilian Journal of Water Resources – RBRH*, 22 (e59).
- Spohr, R. B.; Corcini, A. L. M.; Pellegrin, J.; Bonfanti, J. B.; Soto, M. F. D.; Cardoso, T. (2015). Desenvolvimento e validação de um simulador de chuvas portátil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos, ABRH*, vol. 20, no.2, abr/jun, Porto Alegre, p. 411–417.
- Sriwongsitanon, N.; Taesombat, W. (2011). Effects of land cover on runoff coefficient. *Journal of Hydrology*, vol:410 iss:3-4, p. 226 -238.
- Stillmunkes, R. T.; James, L. G. (1982). Impact energy of water droplets from irrigation sprinklers. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, v.25, n.1, p. 130-133.
- Temez, J. R. (1978). *Calculo Hidrometeorologico de Caudales Maximos em Pequenas Cuencas Naturales*. Ministerio de Obras Publicas y Urbanismo. Direccion General de Carreteras, Madrid.
- Thiessen, A. H.; Alter, J. C. (1911). Climatological Data for July 1911. *Monthly Weather Review July 1911, District No. 10 Great Basin*. p. 1082-1089.
- Tsien, S. I. (1955). Stabilization of marsh deposit. *Highway Research Board Bulletin*, (115).
- Tucci, C. E. M. (2009). *Hidrologia, Ciência e Aplicação*. Quarta Edição. Editora UFRGS/ABRH. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil. p. 335, 349, 350, 351.
- Tung, Y. K. (1983). Point Rainfall Estimation for a Mountainous Region. *Journal of Hydraulic Engineering*, v 109, n 10, p. 1386-1393.
- Tuppad, P.; Douglas-Mankin, K. R.; Lee, T.; Srinivasan, R.; Arnold, J. G. (2011). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic/water quality model: Extended capability and wider adoption. *Trans. ASABE* 54:1677–1684. doi:10.13031/2013.39856.
- Tossell, R. W.; Dickinson, W. T.; Rudra, R. P.; Wall, G. J. (1987). A portable rainfall simulator. *Canadian Agricultural Engineering, Guelph*, v.29, n.2, p.155-162.
- Uijlenhoet, R.; Stricker J. N. M. (1999). A Consistent Rainfall Parameterization Based on The Exponential Raindrop Size Distribution. *Journal of Hydrology*, n.218, 19/02/1999, p. 101- 127.
- US Army Corps of Engineers. (2006). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User Manual, CPD-74A version 3.0.1*. Hydrologic Engineering Center, p. 280.
- van Dijk, A. I. J. M.; Bruijnzeel, L. A.; Rosewell, C. J. (2002). Rainfall Intensity-Kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *Journal of Hydrology*, n. 261, 18 de Janeiro de 2002, p. 1-23.

- van Genuchten, M. TH. (1980). A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of saturated soils. *Soil Science of America Journal*, v. 44, p. 892-898. doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- Vaz, E. F. (2019). On the equilibrium of suction and pressure plate tests. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.
- Viessman, Jr. W.; Lewis, G. L. (1996). *Introduction to hydrology*, 4^o Edição, HarperCollins College Publishers, New York.
- Wang, Y. C.; Lai, C. C. (2018). Evaluating the erosion process from a single-stripe laser-scanned topography: A laboratory case study. *Journal Water*, 10, 958, p. 16. doi:10.3390/w10070956. www.mdpi.com/journal/water.
- Wilken, P. S. (1978). *Engenharia de Drenagem Superficial*. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. São Paulo, SP.
- Wilcox, B. P.; Wood, M. K.; Tromble, J. T.; Ward, T. J. (1986). A Hand-Portable Single Nozzle Rainfall Simulator Designed for Use on Steep Slopes. *Journal of Range Management*, v.39, n.4, jul. 1986, p. 375 - 377.
- WMO - World Meteorological Organization (2014). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8)*, updated 2017. Geneva, Switzerland, 1.177 p.
- Wu, T. H.; Chang, N. Y.; Ali, E. M. (1978). Consolidation and strength properties of a clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 104(ASCE 13891 Proceeding).
- Young, C. B.; McEnroe, B. M.; Rome, A. C. (2009). Empirical Determination of Rational Method Runoff Coefficients. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(12), ASCE, New York, 1283–1289.
- Zhai, O.; Rahardjo, H. (2013). Quantification of uncertainties in soil-water characteristic curve associated with fitting parameters. *Engineering Geology*, 163: 144-152.
- Zhang, X.; Yu, G. Q.; Li, Z. B.; Li, P. (2014). Experimental Study on Slope Runoff, Erosion and Sediment under Different Vegetation Types. *Water Resource Management*, v.28, p. 2415-2433. doi:10.1007/s11269-014-0603-5.

Anexo A – Certificado de calibração do manômetro seco utilizado no SC.



Home page: www.furnas.com.br, e-mail: dtece@furnas.com.br

GERÊNCIA DE SERVIÇOS E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA - DIVISÃO DE TECNOLOGIA EM ENGENHARIA CIVIL
 PROCESSO: CONFIABILIDADE METROLÓGICA - ÁREA: PRESSÃO
 Rodovia BR-153, km 510, Zona Rural, CEP-74923-650 - Aparecida de Goiânia - GO, Fone: (0-62) 3239-6300, Fac-símile: (0-62) 3239-6500

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 2420

Página 1 de 1

1. CLIENTE: UNB - Universidade de Brasília
 Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília - DF
 CEP 70910-900



2. ORDEM DE SERVIÇO: 710

2.1. Datas: Calibração: 18/04/2017

Emissão do Certificado: 15/05/2017

3. IDENTIFICAÇÃO DO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO: Manômetro Analógico

Fabricante: ASHCROFT
 Faixa Nominal: 60 psi
 Faixa de Medição: 0 psi a 60 psi
 Valor de uma divisão: 2 psi

Nº Patrimonial: -
 Nº de Série: -
 Identificação: 1914

4. RESULTADOS :

Referência		Indicada - Manômetro Padrão [psi]			
Manômetro Calibrado		Valores Individuais			
		Primeiro Ciclo		Segundo Ciclo	
[MPa]	[psi]	C	D	C	D
0,00	0	0,000	0,000	0,000	0,000
0,04	6	5,405	5,334	5,476	5,405
0,08	12	11,592	11,592	11,663	11,521
0,12	18	17,708	17,779	17,637	17,708
0,17	24	24,109	23,753	24,037	23,824
0,21	30	29,869	29,727	29,869	29,798
0,25	36	35,843	35,701	35,985	35,629
0,29	42	41,959	41,674	41,959	41,746
0,33	48	48,146	47,933	48,075	48,004
0,37	54	54,262	54,333	54,333	54,404
0,41	60	60,520	60,520	60,520	60,520

Legenda: C = Carregamento D = Descarregamento

Condições Ambientais
Temperatura Ambiente (°C) : 20,8
Umidade Relativa do Ar (%): 63,8
Pressão Barométrica (mbar): 922,0
Gravidade Local (m/s²): 9,7820283 ± 5,0 x 10E-7

CARACTERÍSTICAS APRESENTADAS PELO DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO
Incerteza da Medição: ± 0,64%
Índice de Exatidão: 1,1%
Histerese: 0,59%
Repetitividade: 0,24%

Fator de Conversão:
1 MPa = 145,038 psi

5. OBSERVAÇÕES:

5.1. Método da calibração:

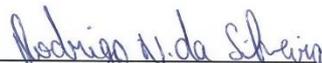
A calibração foi executada conforme instrução de trabalho interna IT.MT.201 - Manômetro Analógico - Calibração - Utilizando Manômetro Padrão - Revisão 00, a partir do método por comparação a padrões rastreados à RBC - Rede Brasileira de Calibração. Foram realizados dois ciclos em pontos distribuídos nos sentidos carregamento e descarregamento.

5.2. Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o nº.: 0251. Este certificado atende aos requisitos de acreditação da Cgcre que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.

5.3. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,04$, o qual para uma distribuição t com $\nu_{eff} = 69$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

5.4. Padrão utilizado:

- Manômetro analógico, nº patrimonial 355-9-17132, certificado de calibração nº CAL-124404/15 - ABSI, válido até 25/05/2017.


 Rodrigo N. da Silveira
 Signatário


 Pedro de C. Barros
 Metrologista

As considerações e resultados contidos neste documento têm validade restrita ao dispositivo analisado e às condições de calibração. A Gerência não se responsabiliza por sua reprodução integral não autorizada. Sua reprodução parcial é proibida.

ANÁLISE DE CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Pág. 1/1

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº: 2420

 Instrumento: **Manômetro Analógico**

Identificação: 1914	Nº Patrimonial: -	Faixa Nominal: 60 psi
Nº de Série: -	Valor de 1 Divisão: 2 psi	Faixa de Medição: 0 psi a 60 psi

Critério de aceitação do resultado da calibração

	Aceitável (%)	Medido (%)	Resultado
1. Índice de Exatidão	1,6	1,1	Aprovado
2. Histerese	1,6	0,59	Aprovado
3. Repetitividade	1,6	0,24	Aprovado

Resultado final
Aprovado em todos os itens.

 Se reprovado, seguir a seguinte orientação: (selecionar somente se aplicável) Não aplicável

- Segregar o instrumento
 Enviar para manutenção
 Reavaliar erro máximo permitido
 Restringir faixa de utilização

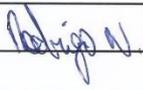
Em caso de restrição, descrever:

1 - Sem restrições.

Outras observações

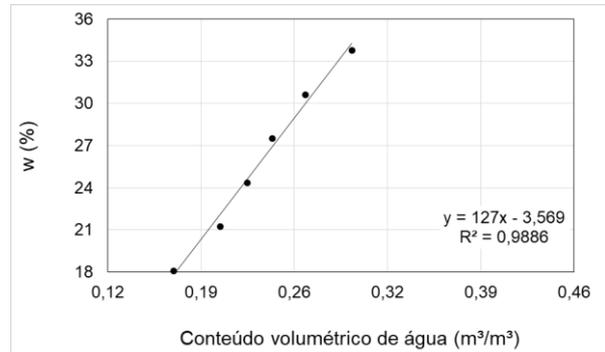
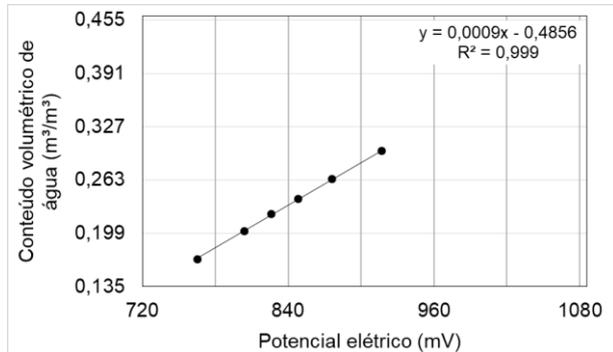
1 - Esta análise estará anexada ao certificado e disponível eletronicamente no Siserv; 2 - Conforme ABNT NBR 14105-1, o manômetro é classificado como sendo classe A, erro máximo admissível de 1,6 %; 3 - O erro máximo encontrado é menor que o valor de uma divisão do instrumento.
--

Rodrigo N. da Silveira
 Matr. 67058-4

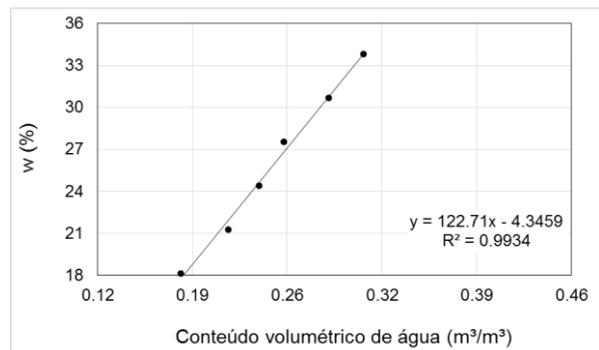
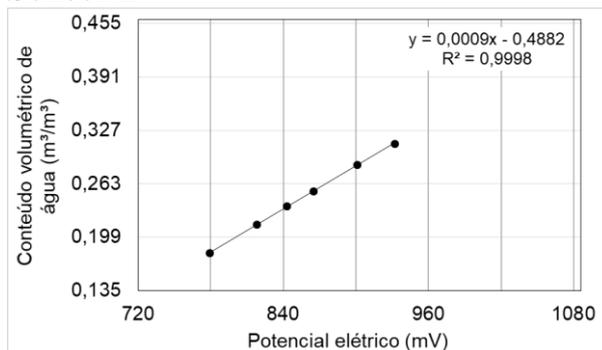
Analisado por: Rodrigo N. 	Data: 15/05/2017
--	---------------------

Anexo B – Curvas de calibração dos sensores de umidade do solo utilizados no SC.

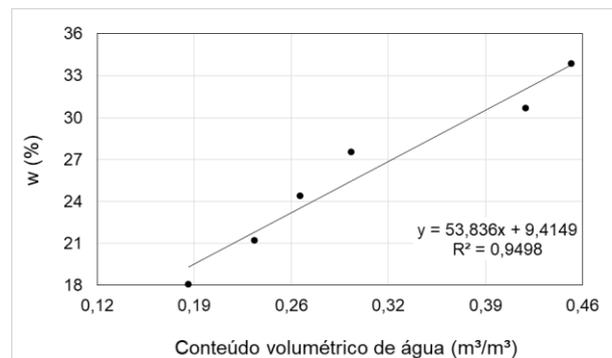
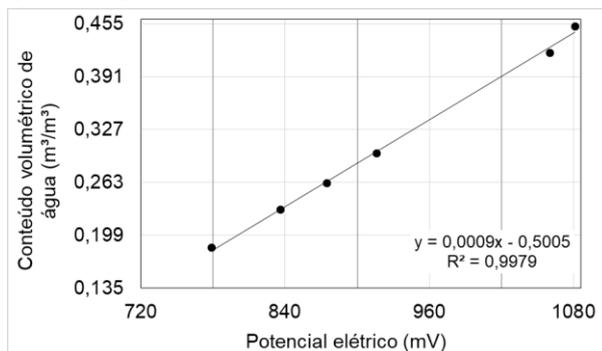
Sensor 1



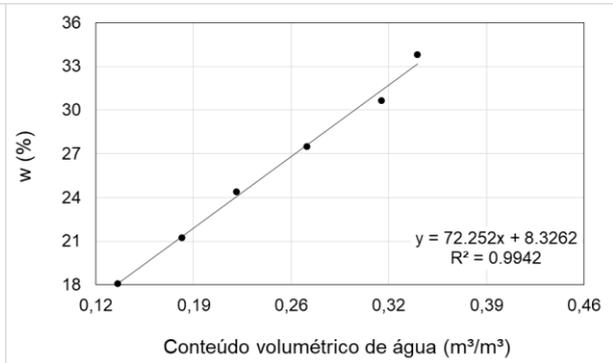
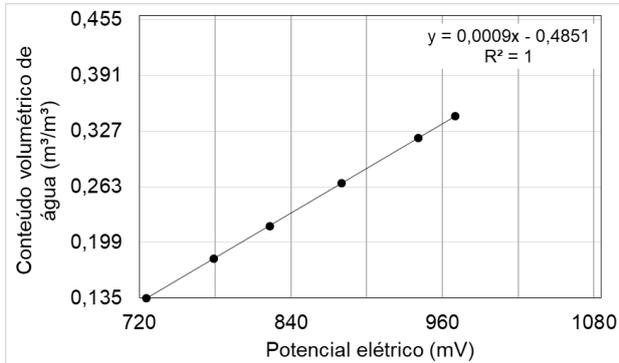
Sensor 2



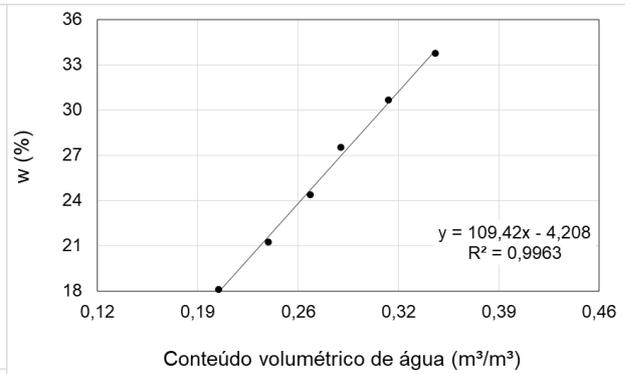
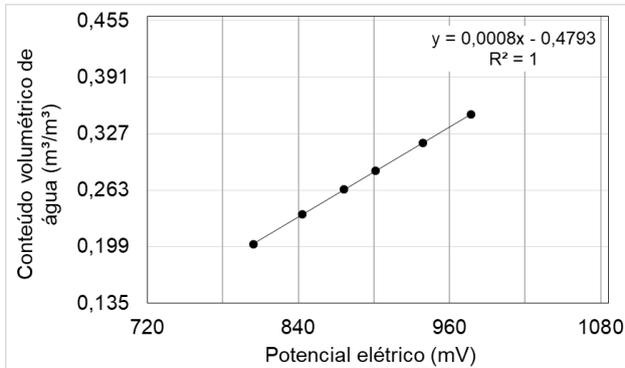
Sensor 3



Sensor 4



Sensor 5



Anexo C – Características técnicas da instrumentação e sensores utilizados no simulador de chuvas (SC).

Equipamento	Modelo/Marca	Principais características	
Inversor de Frequência	WEG/CFW08	Tensão de entrada Corrente	110/220V 1 a 8A
Manômetro	ASHCROFT	Faixa Nominal Faixa de medição Valor de uma divisão	60 psi 0 psi a 60 psi 2 psi
Bico aspersor	1/2" HH 40	Diâmetro do orifício (mm) Diâmetro máx. passagem livre	6,2 mm 3,6 mm
Mini-tensiômetro	PDI Instruments/T5e	Faixa de medição Sinal de saída Precisão Carga Eixo Corpo de sensor	-100 ... +85 kPa -100 ... +85 kPa +/- 5 hPa 10,6 VDC/1,3 mA Diâmetro 5 mm Diâmetro 20 mm Comprimento 35 mm
Sensor de Umidade	ECH20- EC5/Decagon Devices	Funcionamento Intervalo de medição Resolução Exatidão Tempo de resposta Dimensão Agulha Dimensão Circuito	Constante dielétrica 0 a 100% 0,001 cm ³ /cm ³ 0,03 cm ³ /cm ³ 10 ms 50 x 3,2 x 1,5 mm 30 x 20 mm
<i>Data logger e Controller</i>	1) GP2 - Delta T Devices (tensiômetros)	Canais de entrada analógica Tensão de entrada Estabilidade Temperatura de trabalho Programação do tempo resposta Capacidade de armazenamento	12 diferenciais 4 faixas, -1,4V até 2,7V 0,02% -20 até 60°C Múltiplos de 1 segundo 2,5 milhões de valores
	2) Em50 - Decagon Devices (sensores de umidade)	Canais de entrada Tensão de entrada Tipo de porta Temperatura de trabalho Programação do tempo resposta Capacidade de armazenamento	5 portas, 32 bits digital 6,0Vdc 3,5 mm <i>stereo jack</i> -40 até 60°C Múltiplos de 1 minuto 1MB (36.800 leituras)

Anexo D1 – Distribuição espacial das chuvas simuladas – CUC (aspersor ½” quadrado para área de 1,0 m²).

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	4229	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	3449	g
Volume (Chuva Real)	3,47	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	11,10	L
Intensidade Calculada	693,46	mm h⁻¹
Intensidade Média	257,35	mm h⁻¹
Intensidade Real	216,68	mm h⁻¹
Amostra	1	

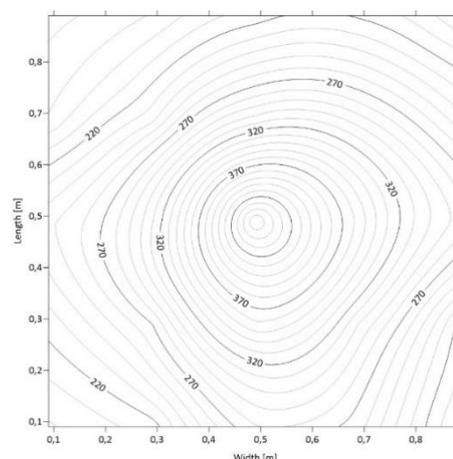


Figura 1 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 257,35 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 1 minuto, 1ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	121,3	111,2	10,1	198,7157352	2,98
2	0,29	0,09	120,4	109,5	10,9	214,4555954	2,18
3	0,49	0,09	123,7	109,5	14,2	279,3825188	1,12
4	0,69	0,09	122,5	109,1	13,4	263,6426586	0,32
5	0,89	0,09	116,7	106,7	10	196,7482527	3,08
6	0,09	0,29	119,0	107,6	11,4	224,2930081	1,68
7	0,29	0,29	120,4	106,7	13,7	269,5451062	0,62
8	0,49	0,29	124,3	106,1	18,2	358,0818199	5,12
9	0,69	0,29	122,1	106,9	15,2	299,0573441	2,12
10	0,89	0,29	117,1	106,2	10,9	214,4555954	2,18
11	0,09	0,49	120,3	107,7	12,6	247,9027984	0,48
12	0,29	0,49	120,6	104,9	15,7	308,8947567	2,62
13	0,49	0,49	132,1	108,7	23,4	460,3909113	10,32
14	0,69	0,49	123,4	105,3	18,1	356,1143374	5,02
15	0,89	0,49	120,7	106,2	14,5	285,2849664	1,42
16	0,09	0,69	118,8	109,1	9,7	190,8458051	3,38
17	0,29	0,69	118,2	106,2	12	236,0979032	1,08
18	0,49	0,69	124,0	108,6	15,4	302,9923091	2,32
19	0,69	0,69	121,2	106,3	14,9	293,1548965	1,82
20	0,89	0,69	120,2	107,9	12,3	242,0003508	0,78
21	0,09	0,89	114,8	105,8	9	177,0734274	4,08
22	0,29	0,89	117,6	107,9	9,7	190,8458051	3,38
23	0,49	0,89	116,2	105,3	10,9	214,4555954	2,18
24	0,69	0,89	119,0	107,9	11,1	218,3905605	1,98
25	0,89	0,89	117,4	107,7	9,7	190,8458051	3,38
25					13,08	257,3467145	65,64
						CUC (%)	79,93

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	4255	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	766	g
Massa (H2O Chuva)	3489	g
Volume (Chuva Real)	3,51	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	11,1	L
Intensidade Calculada	693,46	mm h⁻¹
Intensidade Média	255,22	mm h⁻¹
Intensidade Real	219,18	mm h⁻¹
Amostra	2	

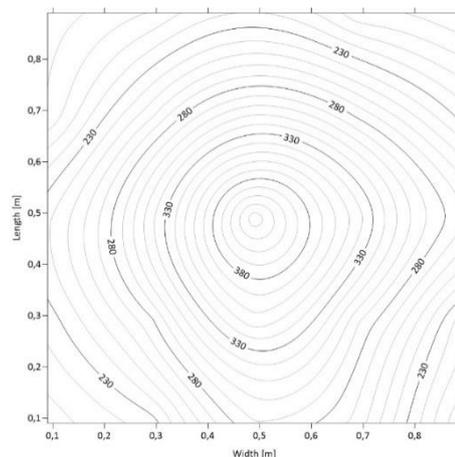


Figura 2 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 255,22 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 1 minuto, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	121,6	111,2	10,4	204,6181828	2,572
2	0,29	0,09	120,9	109,5	11,4	224,2930081	1,572
3	0,49	0,09	124,2	109,5	14,7	289,2199315	1,728
4	0,69	0,09	122,6	109,1	13,5	265,6101411	0,528
5	0,89	0,09	116,4	106,7	9,7	190,8458051	3,272
6	0,09	0,29	119,0	107,6	11,4	224,2930081	1,572
7	0,29	0,29	120,8	106,7	14,1	277,4150363	1,128
8	0,49	0,29	124,2	106,1	18,1	356,1143374	5,128
9	0,69	0,29	121,7	106,9	14,8	291,187414	1,828
10	0,89	0,29	117,1	106,2	10,9	214,4555954	2,072
11	0,09	0,49	119,8	107,7	12,1	238,0653858	0,872
12	0,29	0,49	121,0	104,9	16,1	316,7646868	3,128
13	0,49	0,49	130,4	108,7	21,7	426,9437083	8,728
14	0,69	0,49	122,8	105,3	17,5	344,3094422	4,528
15	0,89	0,49	120,1	106,2	13,9	273,4800712	0,928
16	0,09	0,69	118,8	109,1	9,7	190,8458051	3,272
17	0,29	0,69	119,3	106,2	13,1	257,740211	0,128
18	0,49	0,69	124,4	108,6	15,8	310,8622393	2,828
19	0,69	0,69	120,4	106,3	14,1	277,4150363	1,128
20	0,89	0,69	119,4	107,9	11,5	226,2604906	1,472
21	0,09	0,89	115,2	105,8	9,4	184,9433575	3,572
22	0,29	0,89	118,1	107,9	10,2	200,6832177	2,772
23	0,49	0,89	116,5	105,3	11,2	220,358043	1,772
24	0,69	0,89	117,7	107,9	9,8	192,8132876	3,172
25	0,89	0,89	116,9	107,7	9,2	181,0083925	3,772
25					12,972	255,2218334	63,472
						CUC (%)	80,43

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	4342	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	3562	g
Volume (Chuva Real)	3,58	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	11,1	L
Intensidade Calculada	693,46	mm h⁻¹
Intensidade Média	258,68	mm h⁻¹
Intensidade Real	223,76	mm h⁻¹
Amostra	3	

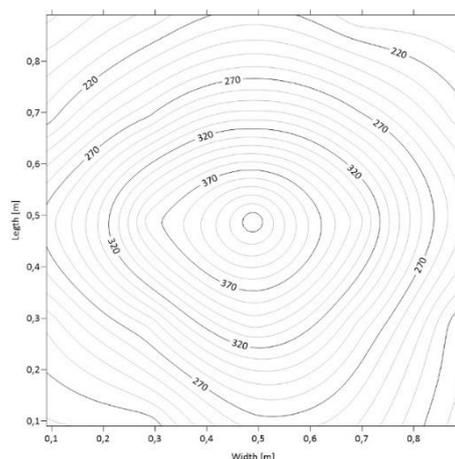


Figura 3 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 258,68 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 1 minuto, 3ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	121,8	111,2	10,6	208,5531479	2,548
2	0,29	0,09	120,3	109,5	10,8	212,4881129	2,348
3	0,49	0,09	122,9	109,5	13,4	263,6426586	0,252
4	0,69	0,09	121,8	109,1	12,7	249,8702809	0,448
5	0,89	0,09	117,1	106,7	10,4	204,6181828	2,748
6	0,09	0,29	119,4	107,6	11,8	232,1629382	1,348
7	0,29	0,29	121,1	106,7	14,4	283,3174839	1,252
8	0,49	0,29	123,6	106,1	17,5	344,3094422	4,352
9	0,69	0,29	121,6	106,9	14,7	289,2199315	1,552
10	0,89	0,29	116,9	106,2	10,7	210,5206304	2,448
11	0,09	0,49	121,7	107,7	14	275,4475538	0,852
12	0,29	0,49	123,5	104,9	18,6	365,95175	5,452
13	0,49	0,49	130,5	108,7	21,8	428,9111909	8,652
14	0,69	0,49	122,9	105,3	17,6	346,2769247	4,452
15	0,89	0,49	119,0	106,2	12,8	251,8377634	0,348
16	0,09	0,69	120,0	109,1	10,9	214,4555954	2,248
17	0,29	0,69	120,0	106,2	13,8	271,5125887	0,652
18	0,49	0,69	124,2	108,6	15,6	306,9272742	2,452
19	0,69	0,69	120,3	106,3	14	275,4475538	0,852
20	0,89	0,69	119,3	107,9	11,4	224,2930081	1,748
21	0,09	0,89	114,8	105,8	9	177,0734274	4,148
22	0,29	0,89	118,2	107,9	10,3	202,6507003	2,848
23	0,49	0,89	116,7	105,3	11,4	224,2930081	1,748
24	0,69	0,89	118,2	107,9	10,3	202,6507003	2,848
25	0,89	0,89	117,9	107,7	10,2	200,6832177	2,948
25					13,148	258,6846026	61,544
						CUC (%)	81,28

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	7488	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	6708	g
Volume (Chuva Real)	6,75	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	22,2	L
Intensidade Calculada	693,46	mm h⁻¹
Intensidade Média	251,21	mm h⁻¹
Intensidade Real	210,71	mm h⁻¹
Amostra	1	

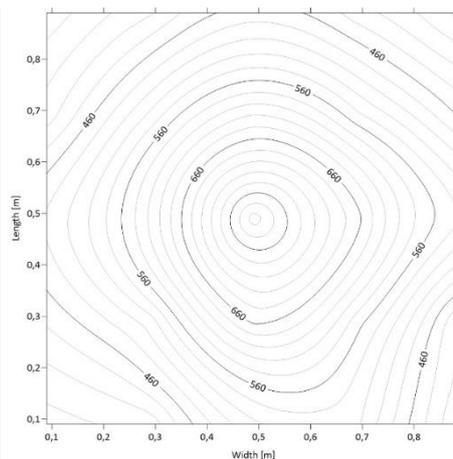


Figura 4 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 251,21 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 2 minutos, 1ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	131,1	111,2	19,9	391,529023	5,636
2	0,29	0,09	130,2	109,5	20,7	407,268883	4,836
3	0,49	0,09	135,7	109,5	26,2	515,480422	0,664
4	0,69	0,09	135,7	109,1	26,6	523,350352	1,064
5	0,89	0,09	127,0	106,7	20,3	399,398953	5,236
6	0,09	0,29	130,1	107,6	22,5	442,683569	3,036
7	0,29	0,29	132,6	106,7	25,9	509,577974	0,364
8	0,49	0,29	139,9	106,1	33,8	665,009094	8,264
9	0,69	0,29	135,8	106,9	28,9	568,60245	3,364
10	0,89	0,29	127,3	106,2	21,1	415,138813	4,436
11	0,09	0,49	132,3	107,7	24,6	484,000702	0,936
12	0,29	0,49	135,6	104,9	30,7	604,017136	5,164
13	0,49	0,49	149,9	108,7	41,2	810,602801	15,664
14	0,69	0,49	139,2	105,3	33,9	666,976577	8,364
15	0,89	0,49	133,7	106,2	27,5	541,057695	1,964
16	0,09	0,69	129,9	109,1	20,8	409,236366	4,736
17	0,29	0,69	132,9	106,2	26,7	525,317835	1,164
18	0,49	0,69	140,2	108,6	31,6	621,724479	6,064
19	0,69	0,69	134,0	106,3	27,7	544,99266	2,164
20	0,89	0,69	131,1	107,9	23,2	456,455946	2,336
21	0,09	0,89	124,5	105,8	18,7	367,919233	6,836
22	0,29	0,89	129,1	107,9	21,2	417,106296	4,336
23	0,49	0,89	129,2	105,3	23,9	470,228324	1,636
24	0,69	0,89	129,7	107,9	21,8	428,911191	3,736
25	0,89	0,89	126,7	107,7	19	373,82168	6,536
25					25,536	251,20817	108,536
						CUC (%)	83,00

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	7786	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	7006	g
Volume (Chuva Real)	7,04	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	22,2	L
Intensidade Calculada	693,46	mm h⁻¹
Intensidade Média	250,58	mm h⁻¹
Intensidade Real	220,04	mm h⁻¹
Amostra	2	

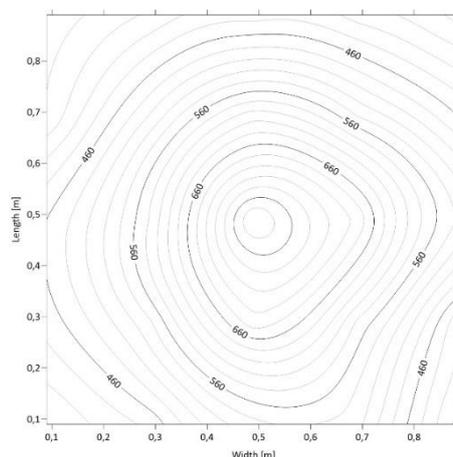


Figura 5 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 250,58 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 2 minutos, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	131,5	111,2	20,3	399,398953	5,172
2	0,29	0,09	132,1	109,5	22,6	444,6510511	2,872
3	0,49	0,09	136,6	109,5	27,1	533,1877648	1,628
4	0,69	0,09	135,9	109,1	26,8	527,2853172	1,328
5	0,89	0,09	126,5	106,7	19,8	389,5615403	5,672
6	0,09	0,29	130,4	107,6	22,8	448,5860161	2,672
7	0,29	0,29	134,0	106,7	27,3	537,1227298	1,828
8	0,49	0,29	141,3	106,1	35,2	692,5538495	9,728
9	0,69	0,29	136,2	106,9	29,3	576,4723804	3,828
10	0,89	0,29	127,6	106,2	21,4	421,0412608	4,072
11	0,09	0,49	131,1	107,7	23,4	460,3909113	2,072
12	0,29	0,49	134,5	104,9	29,6	582,374828	4,128
13	0,49	0,49	149,5	108,7	40,8	802,732871	15,328
14	0,69	0,49	140,6	105,3	35,3	694,521332	9,828
15	0,89	0,49	133,4	106,2	27,2	535,1552473	1,728
16	0,09	0,69	128,5	109,1	19,4	381,6916102	6,072
17	0,29	0,69	131,8	106,2	25,6	503,6755269	0,128
18	0,49	0,69	139,8	108,6	31,2	613,8545484	5,728
19	0,69	0,69	133,8	106,3	27,5	541,0576949	2,028
20	0,89	0,69	131,2	107,9	23,3	458,4234288	2,172
21	0,09	0,89	124,5	105,8	18,7	367,9192325	6,772
22	0,29	0,89	128,4	107,9	20,5	403,333918	4,972
23	0,49	0,89	127,2	105,3	21,9	430,8786734	3,572
24	0,69	0,89	128,8	107,9	20,9	411,2038481	4,572
25	0,89	0,89	126,6	107,7	18,9	371,8541976	6,572
25					25,472	250,57857	114,472
						CUC (%)	82,02

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	7896	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	7116	g
Volume (Chuva Real)	7,15	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	22,2	L
Intensidade Calculada	693,4611	mm h⁻¹
Intensidade Média	253,6872	mm h⁻¹
Intensidade Real	223,4902	mm h⁻¹
Amostra	3	

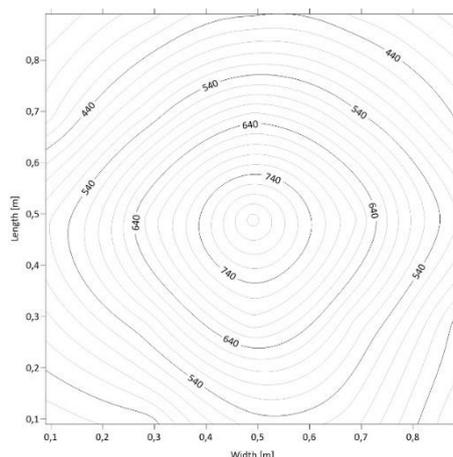


Figura 6 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 253,69 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 2 minutos, 3^o Réplica.

N ^o Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	131,8	111,2	20,6	405,3014005	5,188
2	0,29	0,09	131,2	109,5	21,7	426,9437083	4,088
3	0,49	0,09	136,3	109,5	26,8	527,2853172	1,012
4	0,69	0,09	134,7	109,1	25,6	503,6755269	0,188
5	0,89	0,09	126,9	106,7	20,2	397,4314704	5,588
6	0,09	0,29	131,6	107,6	24	472,1958065	1,788
7	0,29	0,29	135,4	106,7	28,7	564,6674852	2,912
8	0,49	0,29	141,3	106,1	35,2	692,5538495	9,412
9	0,69	0,29	136,1	106,9	29,2	574,5048979	3,412
10	0,89	0,29	128,0	106,2	21,8	428,9111909	3,988
11	0,09	0,49	133,9	107,7	26,2	515,480422	0,412
12	0,29	0,49	138,9	104,9	34	668,9440591	8,212
13	0,49	0,49	150,9	108,7	42,2	830,2776264	16,412
14	0,69	0,49	139,9	105,3	34,6	680,7489543	8,812
15	0,89	0,49	132,6	106,2	26,4	519,4153871	0,612
16	0,09	0,69	128,9	109,1	19,8	389,5615403	5,988
17	0,29	0,69	132,8	106,2	26,6	523,3503522	0,812
18	0,49	0,69	140,5	108,6	31,9	627,6269261	6,112
19	0,69	0,69	134,2	106,3	27,9	548,927625	2,112
20	0,89	0,69	129,9	107,9	22	432,8461559	3,788
21	0,09	0,89	123,2	105,8	17,4	342,3419597	8,388
22	0,29	0,89	127,8	107,9	19,9	391,5290229	5,888
23	0,49	0,89	127,5	105,3	22,2	436,781121	3,588
24	0,69	0,89	129,0	107,9	21,1	415,1388132	4,688
25	0,89	0,89	126,4	107,7	18,7	367,9192325	7,088
25					25,788	253,6872	120,488
						CUC (%)	81,31

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	18080	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	17300	g
Volume (Chuva Real)	17,39	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	55,5	L
Intensidade Calculada	693,46	mm h⁻¹
Intensidade Média	241,39	mm h⁻¹
Intensidade Real	217,32	mm h⁻¹
Amostra	1	

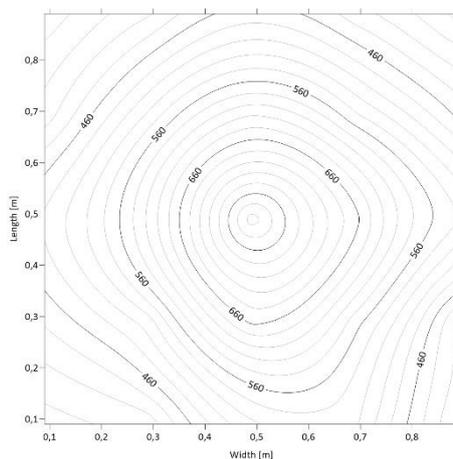


Figura 7 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 241,39 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 5 minutos, 1ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	157,9	111,2	46,7	918,8143401	14,644
2	0,29	0,09	159,3	109,5	49,8	979,8062984	11,544
3	0,49	0,09	172,6	109,5	63,1	1241,481474	1,756
4	0,69	0,09	173,7	109,1	64,6	1270,993712	3,256
5	0,89	0,09	156,7	106,7	50	983,7412635	11,344
6	0,09	0,29	159,4	107,6	51,8	1019,155949	9,544
7	0,29	0,29	167,9	106,7	61,2	1204,099306	0,144
8	0,49	0,29	186,2	106,1	80,1	1575,953504	18,756
9	0,69	0,29	179,3	106,9	72,4	1424,457349	11,056
10	0,89	0,29	160,5	106,2	54,3	1068,343012	7,044
11	0,09	0,49	165,6	107,7	57,9	1139,172383	3,444
12	0,29	0,49	177,7	104,9	72,8	1432,32728	11,456
13	0,49	0,49	201,2	108,7	92,5	1819,921337	31,156
14	0,69	0,49	189,5	105,3	84,2	1656,620288	22,856
15	0,89	0,49	172,9	106,2	66,7	1312,310845	5,356
16	0,09	0,69	157,3	109,1	48,2	948,326578	13,144
17	0,29	0,69	168,9	106,2	62,7	1233,611544	1,356
18	0,49	0,69	186,1	108,6	77,5	1524,798958	16,156
19	0,69	0,69	177,4	106,3	71,1	1398,880077	9,756
20	0,89	0,69	165,3	107,9	57,4	1129,33497	3,944
21	0,09	0,89	147,8	105,8	42	826,3426613	19,344
22	0,29	0,89	158,1	107,9	50,2	987,6762285	11,144
23	0,49	0,89	161,2	105,3	55,9	1099,822733	5,444
24	0,69	0,89	162,0	107,9	54,1	1064,408047	7,244
25	0,89	0,89	154,1	107,7	46,4	912,9118925	14,944
25					61,344	241,3865	265,832
						CUC (%)	82,67

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	18080	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	17300	g
Volume (Chuva Real)	17,39	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	55,5	L
Intensidade Calculada	693,461058	mm h⁻¹
Intensidade Média	241,72	mm h⁻¹
Intensidade Real	217,318637	mm h⁻¹
Amostra	2	

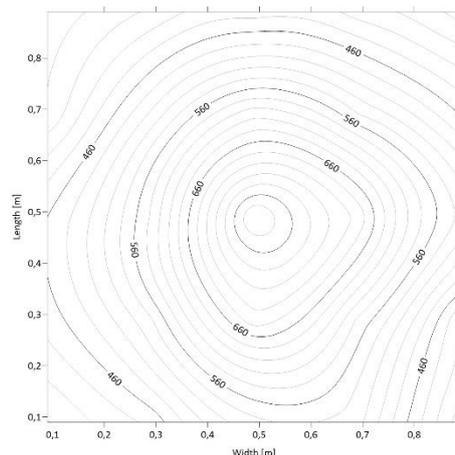


Figura 8 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 241,72 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 5 minutos, 2ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	158,0	111,2	46,8	920,7818226	14,628
2	0,29	0,09	159,5	109,5	50	983,7412635	11,428
3	0,49	0,09	173,6	109,5	64,1	1261,1563	2,672
4	0,69	0,09	171,8	109,1	62,7	1233,611544	1,272
5	0,89	0,09	155,8	106,7	49,1	966,0339207	12,328
6	0,09	0,29	159,9	107,6	52,3	1028,993362	9,128
7	0,29	0,29	169,1	106,7	62,4	1227,709097	0,972
8	0,49	0,29	187,4	106,1	81,3	1599,563294	19,872
9	0,69	0,29	177,6	106,9	70,7	1391,010147	9,272
10	0,89	0,29	158,7	106,2	52,5	1032,928327	8,928
11	0,09	0,49	165,6	107,7	57,9	1139,172383	3,528
12	0,29	0,49	178,9	104,9	74	1455,93707	12,572
13	0,49	0,49	204,5	108,7	95,8	1884,848261	34,372
14	0,69	0,49	189,3	105,3	84	1652,685323	22,572
15	0,89	0,49	171,6	106,2	65,4	1286,733573	3,972
16	0,09	0,69	158,2	109,1	49,1	966,0339207	12,328
17	0,29	0,69	170,7	106,2	64,5	1269,02623	3,072
18	0,49	0,69	185,4	108,6	76,8	1511,026581	15,372
19	0,69	0,69	176,5	106,3	70,2	1381,172734	8,772
20	0,89	0,69	166,5	107,9	58,6	1152,944761	2,828
21	0,09	0,89	147,7	105,8	41,9	824,3751788	19,528
22	0,29	0,89	157,8	107,9	49,9	981,7737809	11,528
23	0,49	0,89	161,3	105,3	56	1101,790215	5,428
24	0,69	0,89	160,9	107,9	53	1042,765739	8,428
25	0,89	0,89	154,4	107,7	46,7	918,8143401	14,728
25					61,428	241,71703	269,528
						CUC (%)	82,45

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	17860	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	17080	g
Volume (Chuva Real)	17,17	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	55,5	L
Intensidade Calculada	693,4611	mm h⁻¹
Intensidade Média	242,0004	mm h⁻¹
Intensidade Real	214,5657	mm h⁻¹
Amostra	3	

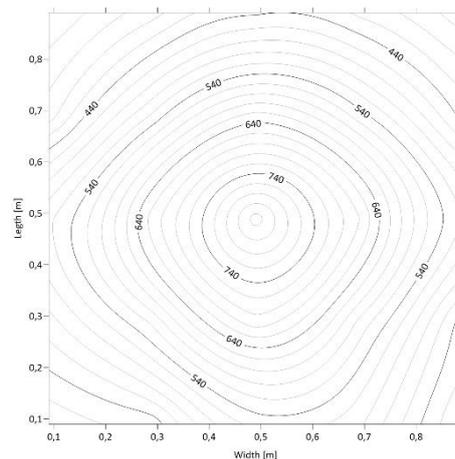


Figura 9 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 242,00 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 5 minutos, 3º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	166,5	111,2	55,3	1088,017837	6,2
2	0,29	0,09	167,7	109,5	58,2	1145,074831	3,3
3	0,49	0,09	171,1	109,5	61,6	1211,969237	0,1
4	0,69	0,09	170,9	109,1	61,8	1215,904202	0,3
5	0,89	0,09	156,3	106,7	49,6	975,8713333	11,9
6	0,09	0,29	158,4	107,6	50,8	999,4811237	10,7
7	0,29	0,29	166,9	106,7	60,2	1184,424481	1,3
8	0,49	0,29	182,6	106,1	76,5	1505,124133	15
9	0,69	0,29	175,8	106,9	68,9	1355,595461	7,4
10	0,89	0,29	158,9	106,2	52,7	1036,863292	8,8
11	0,09	0,49	166,0	107,7	58,3	1147,042313	3,2
12	0,29	0,49	176,8	104,9	71,9	1414,619937	10,4
13	0,49	0,49	201,6	108,7	92,9	1827,791267	31,4
14	0,69	0,49	185,9	105,3	80,6	1585,790917	19,1
15	0,89	0,49	170,2	106,2	64	1259,188817	2,5
16	0,09	0,69	159,8	109,1	50,7	997,5136411	10,8
17	0,29	0,69	170,6	106,2	64,4	1267,058747	2,9
18	0,49	0,69	184,5	108,6	75,9	1493,319238	14,4
19	0,69	0,69	175,5	106,3	69,2	1361,497909	7,7
20	0,89	0,69	165,3	107,9	57,4	1129,33497	4,1
21	0,09	0,89	149,9	105,8	44,1	867,6597944	17,4
22	0,29	0,89	159,8	107,9	51,9	1021,123431	9,6
23	0,49	0,89	162,6	105,3	57,3	1127,367488	4,2
24	0,69	0,89	162,9	107,9	55	1082,11539	6,5
25	0,89	0,89	156,0	107,7	48,3	950,2940605	13,2
25					61,5	242,000351	222,4
						CUC (%)	85,53

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	4496	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	3716	g
Volume (Chuva Real)	3,74	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	13,8	L
Intensidade Calculada	862,14	mm h⁻¹
Intensidade Média	266,79	mm h⁻¹
Intensidade Real	233,42	mm h⁻¹
Amostra	1	

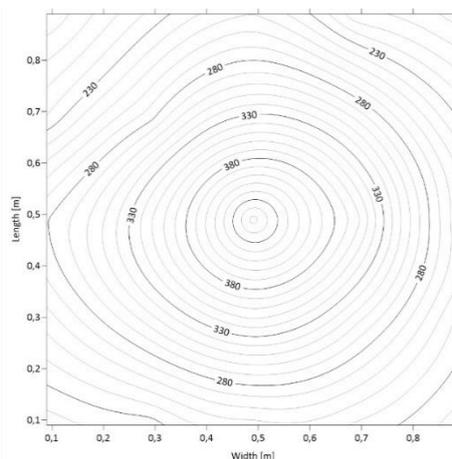


Figura 10 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 266,79 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 1 minuto, 1º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	122,1	111,2	10,9	214,4555954	2,66
2	0,29	0,09	120,9	109,5	11,4	224,2930081	2,16
3	0,49	0,09	122,0	109,5	12,5	245,9353159	1,06
4	0,69	0,09	121,2	109,1	12,1	238,0653858	1,46
5	0,89	0,09	117,6	106,7	10,9	214,4555954	2,66
6	0,09	0,29	120,5	107,6	12,9	253,805246	0,66
7	0,29	0,29	122,1	106,7	15,4	302,9923091	1,84
8	0,49	0,29	123,7	106,1	17,6	346,2769247	4,04
9	0,69	0,29	122,2	106,9	15,3	301,0248266	1,74
10	0,89	0,29	118,2	106,2	12	236,0979032	1,56
11	0,09	0,49	121,9	107,7	14,2	279,3825188	0,64
12	0,29	0,49	122,6	104,9	17,7	348,2444073	4,14
13	0,49	0,49	131,8	108,7	23,1	454,4884637	9,54
14	0,69	0,49	123,8	105,3	18,5	363,9842675	4,94
15	0,89	0,49	119,0	106,2	12,8	251,8377634	0,76
16	0,09	0,69	120,3	109,1	11,2	220,358043	2,36
17	0,29	0,69	120,2	106,2	14	275,4475538	0,44
18	0,49	0,69	125,5	108,6	16,9	332,504547	3,34
19	0,69	0,69	121,4	106,3	15,1	297,0898616	1,54
20	0,89	0,69	119,5	107,9	11,6	228,2279731	1,96
21	0,09	0,89	115,0	105,8	9,2	181,0083925	4,36
22	0,29	0,89	119,2	107,9	11,3	222,3255255	2,26
23	0,49	0,89	118,0	105,3	12,7	249,8702809	0,86
24	0,69	0,89	118,2	107,9	10,3	202,6507003	3,26
25	0,89	0,89	117,1	107,7	9,4	184,9433575	4,16
25					13,56	266,79063	64,4
						CUC (%)	81,00

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	4462	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	3682	g
Volume (Chuva Real)	3,70	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	13,8	L
Intensidade Calculada	862,14	mm h⁻¹
Intensidade Média	264,11	mm h⁻¹
Intensidade Real	231,28	mm h⁻¹
Amostra	2	

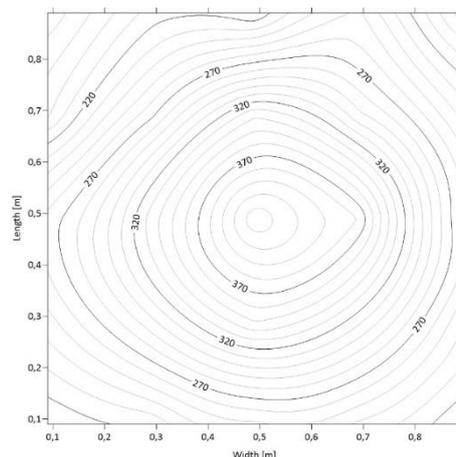


Figura 11 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 264,11 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 1 minuto, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	121,9	111,2	10,7	210,52063	2,724
2	0,29	0,09	120,8	109,5	11,3	222,325526	2,124
3	0,49	0,09	122,1	109,5	12,6	247,902798	0,824
4	0,69	0,09	121,2	109,1	12,1	238,065386	1,324
5	0,89	0,09	117,4	106,7	10,7	210,52063	2,724
6	0,09	0,29	120,1	107,6	12,5	245,935316	0,924
7	0,29	0,29	121,8	106,7	15,1	297,089862	1,676
8	0,49	0,29	123,9	106,1	17,8	350,21189	4,376
9	0,69	0,29	122,8	106,9	15,9	312,829722	2,476
10	0,89	0,29	118,5	106,2	12,3	242,000351	1,124
11	0,09	0,49	121,1	107,7	13,4	263,642659	0,024
12	0,29	0,49	121,9	104,9	17	334,47203	3,576
13	0,49	0,49	129,9	108,7	21,2	417,106296	7,776
14	0,69	0,49	124,6	105,3	19,3	379,724128	5,876
15	0,89	0,49	119,4	106,2	13,2	259,707694	0,224
16	0,09	0,69	119,2	109,1	10,1	198,715735	3,324
17	0,29	0,69	119,8	106,2	13,6	267,577624	0,176
18	0,49	0,69	125,8	108,6	17,2	338,406995	3,776
19	0,69	0,69	121,2	106,3	14,9	293,154897	1,476
20	0,89	0,69	120,0	107,9	12,1	238,065386	1,324
21	0,09	0,89	114,6	105,8	8,8	173,138462	4,624
22	0,29	0,89	118,8	107,9	10,9	214,455595	2,524
23	0,49	0,89	116,0	105,3	10,7	210,52063	2,724
24	0,69	0,89	120,7	107,9	12,8	251,837763	0,624
25	0,89	0,89	117,1	107,7	9,4	184,943358	4,024
25					13,424	264,11485	62,368
						CUC (%)	81,42

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	4419	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	3639	g
Volume (Chuva Real)	3,66	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	13,8	L
Intensidade Calculada	862,1408	mm h⁻¹
Intensidade Média	262,0687	mm h⁻¹
Intensidade Real	228,5864	mm h⁻¹
Amostra	3	

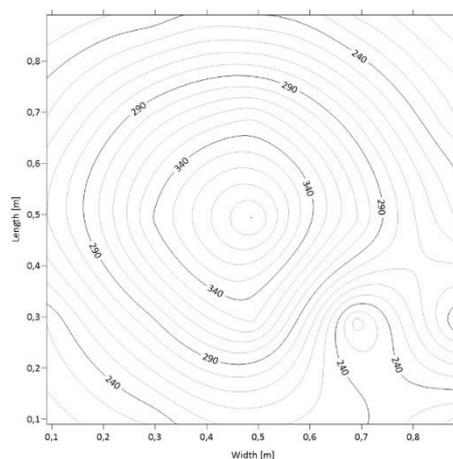


Figura 12 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 262,07 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 1 minuto, 3º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	122,1	111,2	10,9	214,4555954	2,42
2	0,29	0,09	121,2	109,5	11,7	230,1954556	1,62
3	0,49	0,09	122,3	109,5	12,8	251,8377634	0,52
4	0,69	0,09	121,5	109,1	12,4	243,9678333	0,92
5	0,89	0,09	117,6	106,7	10,9	214,4555954	2,42
6	0,09	0,29	119,3	107,6	11,7	230,1954556	1,62
7	0,29	0,29	121,2	106,7	14,5	285,2849664	1,18
8	0,49	0,29	122,9	106,1	16,8	330,5370645	3,48
9	0,69	0,29	117,8	106,9	10,9	214,4555954	2,42
10	0,89	0,29	121,5	106,2	15,3	301,0248266	1,98
11	0,09	0,49	121,4	107,7	13,7	269,5451062	0,38
12	0,29	0,49	122,1	104,9	17,2	338,4069946	3,88
13	0,49	0,49	128,6	108,7	19,9	391,5290229	6,58
14	0,69	0,49	121,1	105,3	15,8	310,8622393	2,48
15	0,89	0,49	118,8	106,2	12,6	247,9027984	0,72
16	0,09	0,69	121,8	109,1	12,7	249,8702809	0,62
17	0,29	0,69	121,5	106,2	15,3	301,0248266	1,98
18	0,49	0,69	125,3	108,6	16,7	328,569582	3,38
19	0,69	0,69	120,4	106,3	14,1	277,4150363	0,78
20	0,89	0,69	119,0	107,9	11,1	218,3905605	2,22
21	0,09	0,89	117,0	105,8	11,2	220,358043	2,12
22	0,29	0,89	119,7	107,9	11,8	232,1629382	1,52
23	0,49	0,89	117,5	105,3	12,2	240,0328683	1,12
24	0,69	0,89	119,0	107,9	11,1	218,3905605	2,22
25	0,89	0,89	117,4	107,7	9,7	190,8458051	3,62
25					13,32	262,068673	52,2
						CUC (%)	84,32

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	8200	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	7420	g
Volume (Chuva Real)	7,46	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	27,6	L
Intensidade Calculada	862,14	mm h⁻¹
Intensidade Média	268,99	mm h⁻¹
Intensidade Real	233,05	mm h⁻¹
Amostra	1	

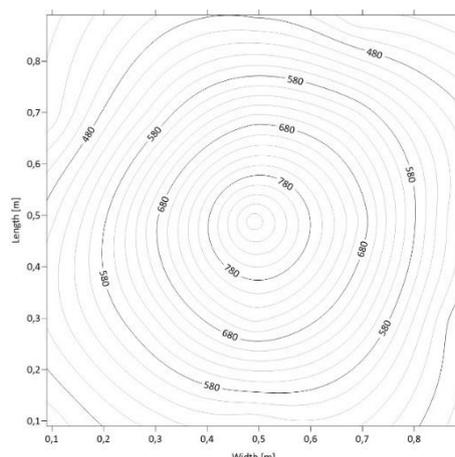


Figura 13 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 268,99 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 2 minutos, 1ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	133,8	111,2	22,6	444,6510511	4,744
2	0,29	0,09	135,1	109,5	25,6	503,6755269	1,744
3	0,49	0,09	135,9	109,5	26,4	519,4153871	0,944
4	0,69	0,09	135,6	109,1	26,5	521,3828696	0,844
5	0,89	0,09	129,6	106,7	22,9	450,5534987	4,444
6	0,09	0,29	133,1	107,6	25,5	501,7080444	1,844
7	0,29	0,29	137,6	106,7	30,9	607,9521008	3,556
8	0,49	0,29	142,6	106,1	36,5	718,1311223	9,156
9	0,69	0,29	138,8	106,9	31,9	627,6269261	4,556
10	0,89	0,29	129,5	106,2	23,3	458,4234288	4,044
11	0,09	0,49	132,6	107,7	24,9	489,9031492	2,444
12	0,29	0,49	138,8	104,9	33,9	666,9765766	6,556
13	0,49	0,49	153,2	108,7	44,5	875,5297245	17,156
14	0,69	0,49	141,0	105,3	35,7	702,3912621	8,356
15	0,89	0,49	131,4	106,2	25,2	495,8055968	2,144
16	0,09	0,69	129,6	109,1	20,5	403,333918	6,844
17	0,29	0,69	134,2	106,2	28	550,8951075	0,656
18	0,49	0,69	142,5	108,6	33,9	666,9765766	6,556
19	0,69	0,69	137,3	106,3	31	609,9195833	3,656
20	0,89	0,69	132,7	107,9	24,8	487,9356667	2,544
21	0,09	0,89	125,7	105,8	19,9	391,5290229	7,444
22	0,29	0,89	131,1	107,9	23,2	456,4559462	4,144
23	0,49	0,89	129,5	105,3	24,2	476,1307715	3,144
24	0,69	0,89	129,2	107,9	21,3	419,0737782	6,044
25	0,89	0,89	128,2	107,7	20,5	403,333918	6,844
25					27,344	268,99421	120,408
						CUC (%)	82,39

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	8120	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	766	g
Massa (H2O Chuva)	7354	g
Volume (Chuva Real)	7,39	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	27,6	L
Intensidade Calculada	862,14	mm h⁻¹
Intensidade Média	264,60	mm h⁻¹
Intensidade Real	230,97	mm h⁻¹
Amostra	2	

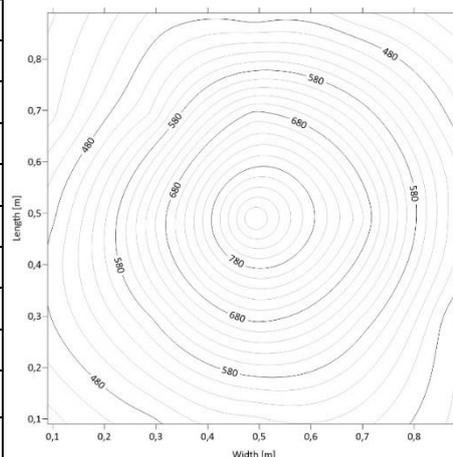


Figura 14 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 264,60 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 2 minutos, 2ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	133,1	111,2	21,9	430,8786734	4,9976
2	0,29	0,09	133,5	109,5	24	472,1958065	2,8976
3	0,49	0,09	135,4	109,5	25,9	509,5779745	0,9976
4	0,69	0,09	134,9	109,1	25,8	507,6104919	1,0976
5	0,89	0,09	129,7	106,7	23	452,5209812	3,8976
6	0,09	0,29	131,8	107,6	24,2	476,1307715	2,6976
7	0,29	0,29	135,9	106,7	29,2	574,5048979	2,3024
8	0,49	0,29	140,7	106,1	34,6	680,7489543	7,7024
9	0,69	0,29	137,4	106,9	30,5	600,0821707	3,6024
10	0,89	0,29	129,1	106,2	22,9	450,5534987	3,9976
11	0,09	0,49	131,6	107,7	23,9	470,2283239	2,9976
12	0,29	0,49	138,0	104,9	33,1	651,2367164	6,2024
13	0,49	0,49	153,6	108,7	44,9	883,3996546	18,0024
14	0,69	0,49	141,6	105,3	36,3	714,1961573	9,4024
15	0,89	0,49	131,5	106,2	25,34	498,5600723	1,5576
16	0,09	0,69	130,0	109,1	20,9	411,2038481	5,9976
17	0,29	0,69	132,8	106,2	26,6	523,3503522	0,2976
18	0,49	0,69	143,7	108,6	35,1	690,5863669	8,2024
19	0,69	0,69	137,1	106,3	30,8	605,9846183	3,9024
20	0,89	0,69	131,4	107,9	23,5	462,3583938	3,3976
21	0,09	0,89	125,9	105,8	20,1	395,4639879	6,7976
22	0,29	0,89	131,4	107,9	23,5	462,3583938	3,3976
23	0,49	0,89	128,8	105,3	23,5	462,3583938	3,3976
24	0,69	0,89	130,4	107,9	22,5	442,6835686	4,3976
25	0,89	0,89	128,1	107,7	20,4	401,3664355	6,4976
25					26,8976	264,60279	118,6384
						CUC (%)	82,36

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	8160	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	7380	g
Volume (Chuva Real)	7,42	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	27,6	L
Intensidade Calculada	862,1408	mm h ⁻¹
Intensidade Média	260,8095	mm h ⁻¹
Intensidade Real	231,7743	mm h ⁻¹
Amostra	3	

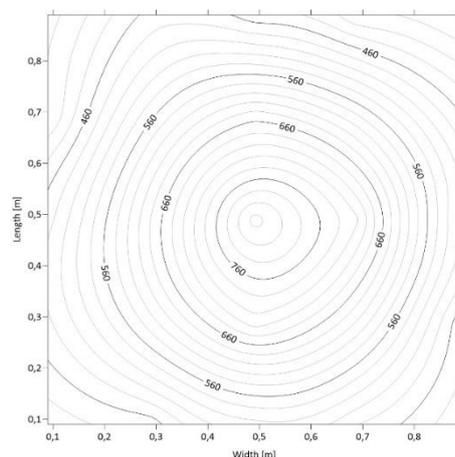


Figura 15 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 260,81 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 2 minutos, 3º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	132,9	111,2	21,7	426,943708	4,812
2	0,29	0,09	132,3	109,5	22,8	448,586016	3,712
3	0,49	0,09	135,6	109,5	26,1	513,51294	0,412
4	0,69	0,09	133,5	109,1	24,4	480,065737	2,112
5	0,89	0,09	128,3	106,7	21,6	424,976226	4,912
6	0,09	0,29	131,8	107,6	24,2	476,130772	2,312
7	0,29	0,29	136,8	106,7	30,1	592,212241	3,588
8	0,49	0,29	142,2	106,1	36,1	710,261192	9,588
9	0,69	0,29	138,3	106,9	31,4	617,789513	4,888
10	0,89	0,29	128,9	106,2	22,7	446,618534	3,812
11	0,09	0,49	131,7	107,7	24	472,195806	2,512
12	0,29	0,49	137,5	104,9	32,6	641,399304	6,088
13	0,49	0,49	150,8	108,7	42,1	828,310144	15,588
14	0,69	0,49	142,0	105,3	36,7	722,066087	10,188
15	0,89	0,49	131,4	106,2	25,2	495,805597	1,312
16	0,09	0,69	129,4	109,1	20,3	399,398953	6,212
17	0,29	0,69	134,5	106,2	28,3	556,797555	1,788
18	0,49	0,69	141,8	108,6	33,2	653,204199	6,688
19	0,69	0,69	136,0	106,3	29,7	584,34231	3,188
20	0,89	0,69	131,4	107,9	23,5	462,358394	3,012
21	0,09	0,89	125,7	105,8	19,9	391,529023	6,612
22	0,29	0,89	131,7	107,9	23,8	468,260841	2,712
23	0,49	0,89	128,0	105,3	22,7	446,618534	3,812
24	0,69	0,89	128,4	107,9	20,5	403,333918	6,012
25	0,89	0,89	126,9	107,7	19,2	377,756645	7,312
25					26,512	260,80948	123,184
						CUC (%)	81,41

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	19020	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	18240	g
Volume (Chuva Real)	18,34	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	69	L
Intensidade Calculada	862,14	mm h⁻¹
Intensidade Média	252,69	mm h⁻¹
Intensidade Real	229,12	mm h⁻¹
Amostra	1	

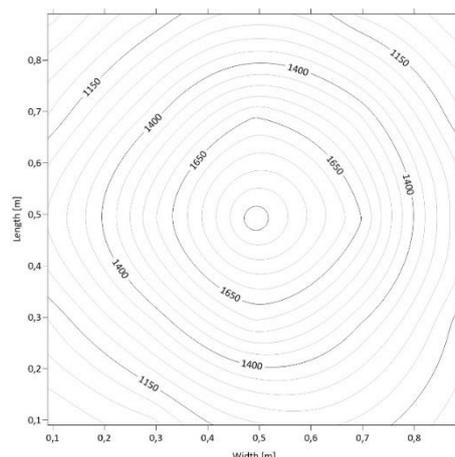


Figura 16 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 252,69 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 5 minutos, 1º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	159,3	111,2	48,1	946,3590954	16,116
2	0,29	0,09	161,7	109,5	52,2	1027,025879	12,016
3	0,49	0,09	170,0	109,5	60,5	1190,326929	3,716
4	0,69	0,09	169,3	109,1	60,2	1184,424481	4,016
5	0,89	0,09	160,8	106,7	54,1	1064,408047	10,116
6	0,09	0,29	163,2	107,6	55,6	1093,920285	8,616
7	0,29	0,29	174,6	106,7	67,9	1335,920636	3,684
8	0,49	0,29	187,1	106,1	81	1593,660847	16,784
9	0,69	0,29	178,6	106,9	71,7	1410,684972	7,484
10	0,89	0,29	163,3	106,2	57,1	1123,432523	7,116
11	0,09	0,49	171,6	107,7	63,9	1257,221335	0,316
12	0,29	0,49	185,4	104,9	80,5	1583,823434	16,284
13	0,49	0,49	207,1	108,7	98,4	1936,002806	34,184
14	0,69	0,49	190,1	105,3	84,8	1668,425183	20,584
15	0,89	0,49	167,7	106,2	61,5	1210,001754	2,716
16	0,09	0,69	165,1	109,1	56	1101,790215	8,216
17	0,29	0,69	176,0	106,2	69,8	1373,302804	5,584
18	0,49	0,69	192,4	108,6	83,8	1648,750358	19,584
19	0,69	0,69	180,7	106,3	74,4	1463,807	10,184
20	0,89	0,69	163,9	107,9	56	1101,790215	8,216
21	0,09	0,89	152,9	105,8	47,1	926,6842702	17,116
22	0,29	0,89	163,5	107,9	55,6	1093,920285	8,616
23	0,49	0,89	166,9	105,3	61,6	1211,969237	2,616
24	0,69	0,89	163,4	107,9	55,5	1091,952802	8,716
25	0,89	0,89	155,8	107,7	48,1	946,3590954	16,116
25					64,216	252,68772	268,712
						CUC (%)	83,26

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	19180	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	18400	g
Volume (Chuva Real)	18,50	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	69	L
Intensidade Calculada	862,14	mm h⁻¹
Intensidade Média	254,99	mm h⁻¹
Intensidade Real	231,13	mm h⁻¹
Amostra	2	

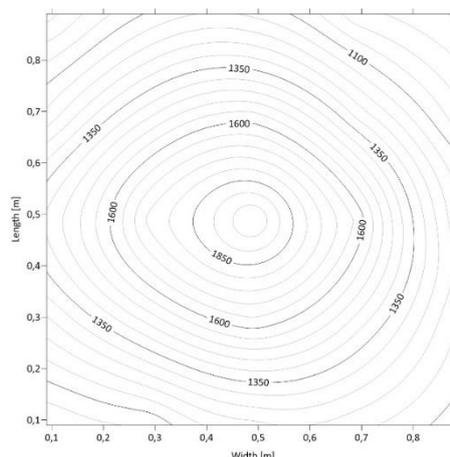


Figura 17 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 254,99 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 5 minutos, 2ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	162,0	111,2	50,8	999,4811237	14
2	0,29	0,09	163,0	109,5	53,5	1052,603152	11,3
3	0,49	0,09	169,7	109,5	60,2	1184,424481	4,6
4	0,69	0,09	168,3	109,1	59,2	1164,749656	5,6
5	0,89	0,09	161,0	106,7	54,3	1068,343012	10,5
6	0,09	0,29	170,3	107,6	62,7	1233,611544	2,1
7	0,29	0,29	180,9	106,7	74,2	1459,872035	9,4
8	0,49	0,29	189,0	106,1	82,9	1631,043015	18,1
9	0,69	0,29	179,4	106,9	72,5	1426,424832	7,7
10	0,89	0,29	164,2	106,2	58	1141,139866	6,8
11	0,09	0,49	179,4	107,7	71,7	1410,684972	6,9
12	0,29	0,49	194,7	104,9	89,8	1766,799309	25
13	0,49	0,49	210,7	108,7	102	2006,832177	37,2
14	0,69	0,49	188,7	105,3	83,4	1640,880427	18,6
15	0,89	0,49	165,0	106,2	58,8	1156,879726	6
16	0,09	0,69	168,4	109,1	59,3	1166,717138	5,5
17	0,29	0,69	179,8	106,2	73,6	1448,06714	8,8
18	0,49	0,69	188,5	108,6	79,9	1572,018539	15,1
19	0,69	0,69	172,0	106,3	65,7	1292,63602	0,9
20	0,89	0,69	159,6	107,9	51,7	1017,188466	13,1
21	0,09	0,89	153,0	105,8	47,2	928,6517527	17,6
22	0,29	0,89	164,2	107,9	56,3	1107,692663	8,5
23	0,49	0,89	163,2	105,3	57,9	1139,172383	6,9
24	0,69	0,89	157,0	107,9	49,1	966,0339207	15,7
25	0,89	0,89	153,0	107,7	45,3	891,2695847	19,5
25					64,8	254,9857355	295,4
						CUC (%)	81,77

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	18980	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	18200	g
Volume (Chuva Real)	18,30	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	69	L
Intensidade Calculada	862,1408	mm h⁻¹
Intensidade Média	251,9479	mm h⁻¹
Intensidade Real	228,6168	mm h⁻¹
Amostra	3	

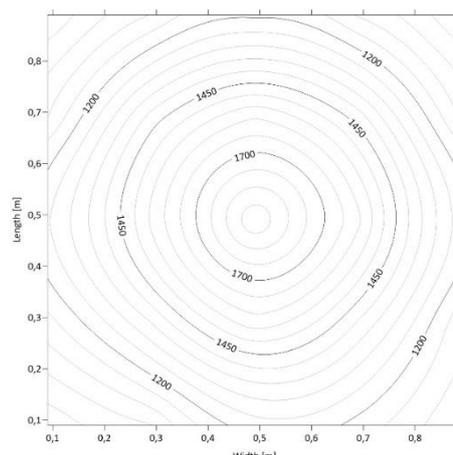


Figura 18 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 251,95 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 5 minutos, 3^o Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _c (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	160,3	111,2	49,1	966,0339207	14,928
2	0,29	0,09	162,7	109,5	53,2	1046,700704	10,828
3	0,49	0,09	171,9	109,5	62,4	1227,709097	1,628
4	0,69	0,09	169,1	109,1	60	1180,489516	4,028
5	0,89	0,09	160,1	106,7	53,4	1050,635669	10,628
6	0,09	0,29	165,1	107,6	57,5	1131,302453	6,528
7	0,29	0,29	175,3	106,7	68,6	1349,693013	4,572
8	0,49	0,29	186,2	106,1	80,1	1575,953504	16,072
9	0,69	0,29	177,7	106,9	70,8	1392,977629	6,772
10	0,89	0,29	162,7	106,2	56,5	1111,627628	7,528
11	0,09	0,49	171,0	107,7	63,3	1245,41644	0,728
12	0,29	0,49	184,1	104,9	79,2	1558,246161	15,172
13	0,49	0,49	204,9	108,7	96,2	1892,718191	32,172
14	0,69	0,49	187,2	105,3	81,9	1611,36819	17,872
15	0,89	0,49	168,3	106,2	62,1	1221,806649	1,928
16	0,09	0,69	165,0	109,1	55,9	1099,822733	8,128
17	0,29	0,69	178,4	106,2	72,2	1420,522384	8,172
18	0,49	0,69	189,8	108,6	81,2	1597,595812	17,172
19	0,69	0,69	178,8	106,3	72,5	1426,424832	8,472
20	0,89	0,69	163,3	107,9	55,4	1089,98532	8,628
21	0,09	0,89	154,5	105,8	48,7	958,1639906	15,328
22	0,29	0,89	163,9	107,9	56	1101,790215	8,028
23	0,49	0,89	165,8	105,3	60,5	1190,326929	3,528
24	0,69	0,89	163,5	107,9	55,6	1093,920285	8,428
25	0,89	0,89	156,1	107,7	48,4	952,261543	15,628
25					64,028	251,94794	252,896
						CUC (%)	84,20

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	5040	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	766	g
Massa (H2O Chuva)	4274	g
Volume (Chuva Real)	4,30	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	15,7	L
Intensidade Calculada	980,84	mm h⁻¹
Intensidade Média	306,69	mm h⁻¹
Intensidade Real	268,47	mm h⁻¹
Amostra	1	

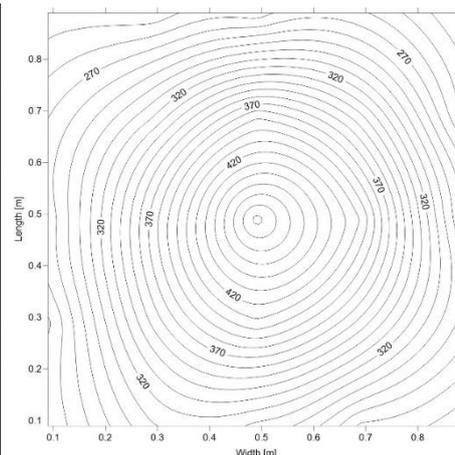


Figura 19 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 306,69 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 1 minuto, 1º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	124,5	111,2	13,3	261,6751761	2,29
2	0,29	0,09	125,2	109,5	15,7	308,8947567	0,11
3	0,49	0,09	125,1	109,5	15,6	306,9272742	0,01
4	0,69	0,09	122,7	109,1	13,6	267,5776237	1,99
5	0,89	0,09	119,5	106,7	12,8	251,8377634	2,79
6	0,09	0,29	120,7	107,6	13,1	257,740211	2,49
7	0,29	0,29	124,6	106,7	17,9	352,1793723	2,31
8	0,49	0,29	126,8	106,1	20,7	407,2688831	5,11
9	0,69	0,29	125,0	106,9	18,1	356,1143374	2,51
10	0,89	0,29	120,7	106,2	14,5	285,2849664	1,09
11	0,09	0,49	121,6	107,7	13,9	273,4800712	1,69
12	0,29	0,49	123,9	104,9	19	373,8216801	3,41
13	0,49	0,49	133,3	108,7	24,6	484,0007016	9,01
14	0,69	0,49	126,1	105,3	20,8	409,2363656	5,21
15	0,89	0,49	120,3	106,2	14,1	277,4150363	1,49
16	0,09	0,69	122,8	109,1	13,7	269,5451062	1,89
17	0,29	0,69	122,4	106,2	16,2	318,7321694	0,61
18	0,49	0,69	128,3	108,6	19,7	387,5940578	4,11
19	0,69	0,69	123,7	106,3	17,4	342,3419597	1,81
20	0,89	0,69	120,4	107,9	12,5	245,9353159	3,09
21	0,09	0,89	118,2	105,8	12,4	243,9678333	3,19
22	0,29	0,89	120,2	107,9	12,3	242,0003508	3,29
23	0,49	0,89	118,2	105,3	12,9	253,805246	2,69
24	0,69	0,89	121,2	107,9	13,3	261,6751761	2,29
25	0,89	0,89	119,3	107,7	11,6	228,2279731	3,99
25					15,588	306,691176	68,464
						CUC (%)	82,43

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	5010	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	4230	g
Volume (Chuva Real)	4,25	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	15,7	L
Intensidade Calculada	980,84	mm h ⁻¹
Intensidade Média	306,39	mm h ⁻¹
Intensidade Real	265,72	mm h ⁻¹
Amostra	2	

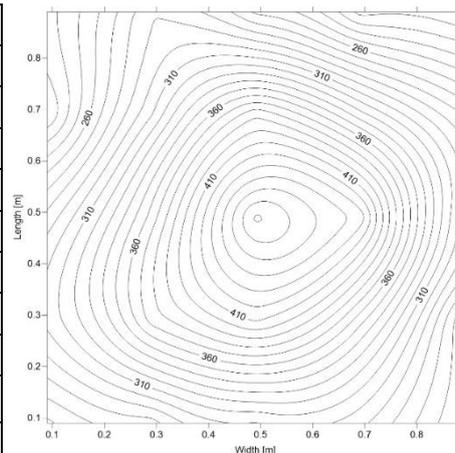


Figura 20 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 306,39 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 1 minuto, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _c (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	124,3	111,2	13,1	257,740211	2,472496
2	0,29	0,09	123,5	109,5	14	275,4475538	1,572496
3	0,49	0,09	124,7	109,5	15,2124	299,3013119	0,360096
4	0,69	0,09	124,0	109,1	14,9	293,1548965	0,672496
5	0,89	0,09	119,4	106,7	12,7	249,8702809	2,872496
6	0,09	0,29	123,0	107,6	15,4	302,9923091	0,172496
7	0,29	0,29	125,7	106,7	19	373,8216801	3,427504
8	0,49	0,29	127,0	106,1	20,9	411,2038481	5,327504
9	0,69	0,29	124,9	106,9	18	354,1468548	2,427504
10	0,89	0,29	118,9	106,2	12,7	249,8702809	2,872496
11	0,09	0,49	122,1	107,7	14,4	283,3174839	1,172496
12	0,29	0,49	123,4	104,9	18,5	363,9842675	2,927504
13	0,49	0,49	132,7	108,7	24	472,1958065	8,427504
14	0,69	0,49	127,5	105,3	22,2	436,781121	6,627504
15	0,89	0,49	121,2	106,2	15	295,122379	0,572496
16	0,09	0,69	120,3	109,1	11,2	220,358043	4,372496
17	0,29	0,69	121,9	106,2	15,7	308,8947567	0,127504
18	0,49	0,69	128,3	108,6	19,7	387,5940578	4,127504
19	0,69	0,69	123,3	106,3	17	334,4720296	1,427504
20	0,89	0,69	122,1	107,9	14,2	279,3825188	1,372496
21	0,09	0,89	117,8	105,8	12	236,0979032	3,572496
22	0,29	0,89	122,6	107,9	14,7	289,2199315	0,872496
23	0,49	0,89	118,4	105,3	13,1	257,740211	2,472496
24	0,69	0,89	118,9	107,9	11	216,423078	4,572496
25	0,89	0,89	118,4	107,7	10,7	210,5206304	4,872496
25					15,5725	306,38614	69,69507
						CUC (%)	82,10

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	5080	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	766	g
Massa (H2O Chuva)	4314	g
Volume (Chuva Real)	4,34	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	15,7	L
Intensidade Calculada	980,8413	mm h⁻¹
Intensidade Média	307,4782	mm h⁻¹
Intensidade Real	270,9768	mm h⁻¹
Amostra	3	

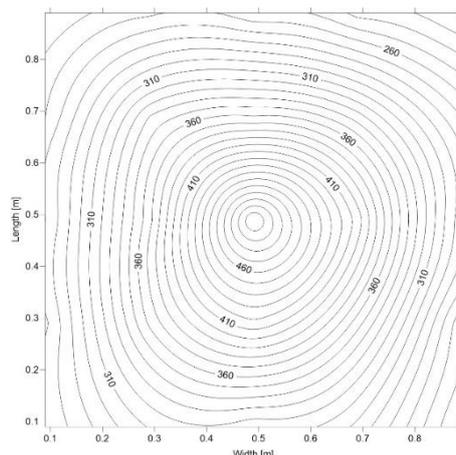


Figura 21 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 307,48 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 1 minuto, 3ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	125,0	111,2	13,8	271,5125887	1,828
2	0,29	0,09	125,3	109,5	15,8	310,8622393	0,172
3	0,49	0,09	125,4	109,5	15,9	312,8297218	0,272
4	0,69	0,09	124,2	109,1	15,1	297,0898616	0,528
5	0,89	0,09	118,8	106,7	12,1	238,0653858	3,528
6	0,09	0,29	121,2	107,6	13,6	267,5776237	2,028
7	0,29	0,29	125,1	106,7	18,4	362,0167849	2,772
8	0,49	0,29	127,3	106,1	21,2	417,1062957	5,572
9	0,69	0,29	124,9	106,9	18	354,1468548	2,372
10	0,89	0,29	119,0	106,2	12,8	251,8377634	2,828
11	0,09	0,49	121,4	107,7	13,7	269,5451062	1,928
12	0,29	0,49	123,5	104,9	18,6	365,95175	2,972
13	0,49	0,49	134,7	108,7	26	511,545457	10,372
14	0,69	0,49	125,9	105,3	20,6	405,3014005	4,972
15	0,89	0,49	120,6	106,2	14,4	283,3174839	1,228
16	0,09	0,69	122,3	109,1	13,2	259,7076936	2,428
17	0,29	0,69	123,5	106,2	17,3	340,3744772	1,672
18	0,49	0,69	126,9	108,6	18,3	360,0493024	2,672
19	0,69	0,69	123,3	106,3	17	334,4720296	1,372
20	0,89	0,69	121,6	107,9	13,7	269,5451062	1,928
21	0,09	0,89	118,0	105,8	12,2	240,0328683	3,428
22	0,29	0,89	121,0	107,9	13,1	257,740211	2,528
23	0,49	0,89	118,1	105,3	12,8	251,8377634	2,828
24	0,69	0,89	119,9	107,9	12	236,0979032	3,628
25	0,89	0,89	118,8	107,7	11,1	218,3905605	4,528
25					15,628	307,478169	70,384
						CUC (%)	81,99

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	9500	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	8720	g
Volume (Chuva Real)	8,77	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	31,4	L
Intensidade Calculada	980,84	mm h⁻¹
Intensidade Média	304,45	mm h⁻¹
Intensidade Real	273,85	mm h⁻¹
Amostra	1	

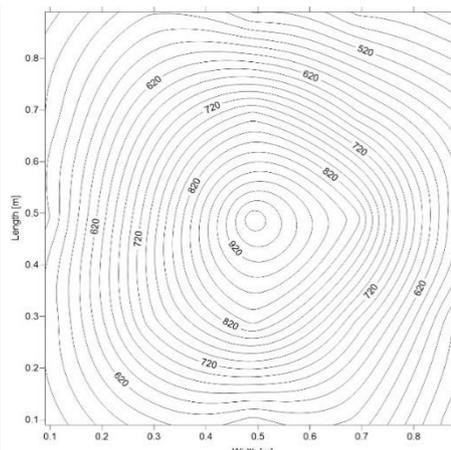


Figura 22 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 304,45 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 2 minutos, 1º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m_t (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	137,8	111,2	26,6	523,3503522	4,348
2	0,29	0,09	139,5	109,5	30	590,2447581	0,948
3	0,49	0,09	139,1	109,5	29,6	582,374828	1,348
4	0,69	0,09	139,2	109,1	30,1	592,2122406	0,848
5	0,89	0,09	131,0	106,7	24,3	478,098254	6,648
6	0,09	0,29	135,0	107,6	27,4	539,0902124	3,548
7	0,29	0,29	143,7	106,7	37	727,968535	6,052
8	0,49	0,29	149,1	106,1	43	846,0174866	12,052
9	0,69	0,29	142,3	106,9	35,4	696,4888145	4,452
10	0,89	0,29	132,0	106,2	25,8	507,6104919	5,148
11	0,09	0,49	133,7	107,7	26	511,545457	4,948
12	0,29	0,49	142,4	104,9	37,5	737,8059476	6,552
13	0,49	0,49	158,3	108,7	49,6	975,8713333	18,652
14	0,69	0,49	148,5	105,3	43,2	849,9524516	12,252
15	0,89	0,49	135,3	106,2	29,1	572,5374153	1,848
16	0,09	0,69	134,5	109,1	25,4	499,7405618	5,548
17	0,29	0,69	139,5	106,2	33,3	655,1716815	2,352
18	0,49	0,69	147,7	108,6	39,1	769,285668	8,152
19	0,69	0,69	139,2	106,3	32,9	647,3017514	1,952
20	0,89	0,69	135,2	107,9	27,3	537,1227298	3,648
21	0,09	0,89	129,7	105,8	23,9	470,2283239	7,048
22	0,29	0,89	135,2	107,9	27,3	537,1227298	3,648
23	0,49	0,89	130,6	105,3	25,3	497,7730793	5,648
24	0,69	0,89	131,0	107,9	23,1	454,4884637	7,848
25	0,89	0,89	129,2	107,7	21,5	423,0087433	9,448
25					30,948	304,44825	144,936
						CUC (%)	81,27

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	9360	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	766	g
Massa (H2O Chuva)	8594	g
Volume (Chuva Real)	8,64	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	31,4	L
Intensidade Calculada	980,84	mm h ⁻¹
Intensidade Média	303,23	mm h ⁻¹
Intensidade Real	269,90	mm h ⁻¹
Amostra	2	

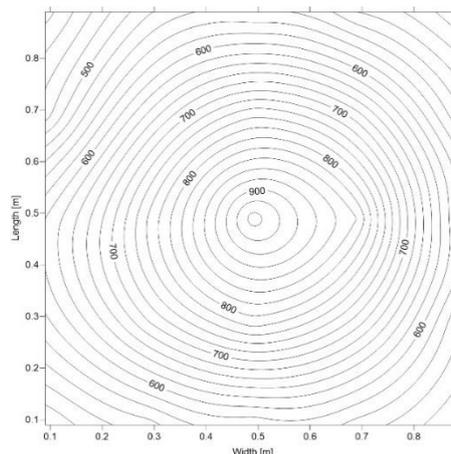


Figura 23 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 303,23 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 2 minutos, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	135,6	111,2	24,4	480,0657366	6,424
2	0,29	0,09	136,5	109,5	27	531,2202823	3,824
3	0,49	0,09	138,2	109,5	28,7	564,6674852	2,124
4	0,69	0,09	137,1	109,1	28	550,8951075	2,824
5	0,89	0,09	132,0	106,7	25,3	497,7730793	5,524
6	0,09	0,29	136,8	107,6	29,2	574,5048979	1,624
7	0,29	0,29	142,3	106,7	35,6	700,4237796	4,776
8	0,49	0,29	146,3	106,1	40,2	790,9279758	9,376
9	0,69	0,29	143,0	106,9	36,1	710,2611922	5,276
10	0,89	0,29	133,6	106,2	27,4	539,0902124	3,424
11	0,09	0,49	138,2	107,7	30,5	600,0821707	0,324
12	0,29	0,49	143,7	104,9	38,8	763,3832204	7,976
13	0,49	0,49	157,0	108,7	48,3	950,2940605	17,476
14	0,69	0,49	148,0	105,3	42,7	840,115039	11,876
15	0,89	0,49	135,4	106,2	29,2	574,5048979	1,624
16	0,09	0,69	133,0	109,1	23,9	470,2283239	6,924
17	0,29	0,69	139,0	106,2	32,8	645,3342688	1,976
18	0,49	0,69	147,0	108,6	38,4	755,5132903	7,576
19	0,69	0,69	141,3	106,3	35	688,6188844	4,176
20	0,89	0,69	134,4	107,9	26,5	521,3828696	4,324
21	0,09	0,89	126,7	105,8	20,9	411,2038481	9,924
22	0,29	0,89	134,2	107,9	26,3	517,4479046	4,524
23	0,49	0,89	132,8	105,3	27,5	541,0576949	3,324
24	0,69	0,89	133,3	107,9	25,4	499,7405618	5,424
25	0,89	0,89	130,2	107,7	22,5	442,6835686	8,324
25					30,824	303,22841	140,968
						CUC (%)	81,71

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	9460	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	8680	g
Volume (Chuva Real)	8,73	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	31,4	L
Intensidade Calculada	980,84	mm h⁻¹
Intensidade Média	304,41	mm h⁻¹
Intensidade Real	272,59	mm h⁻¹
Amostra	3	

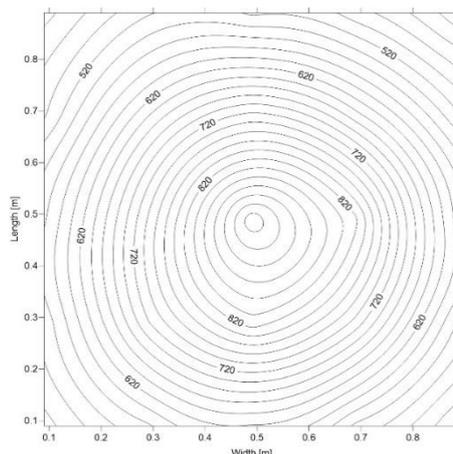


Figura 24 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 304,41 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 2 minutos, 3º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	137,2	111,2	26	511,545457	4,944
2	0,29	0,09	138,8	109,5	29,3	576,4723804	1,644
3	0,49	0,09	140,9	109,5	31,4	617,7895134	0,456
4	0,69	0,09	137,3	109,1	28,2	554,8300726	2,744
5	0,89	0,09	131,0	106,7	24,3	478,098254	6,644
6	0,09	0,29	135,4	107,6	27,8	546,9601425	3,144
7	0,29	0,29	143,2	106,7	36,5	718,1311223	5,556
8	0,49	0,29	148,3	106,1	42,2	830,2776264	11,256
9	0,69	0,29	144,1	106,9	37,2	731,9035	6,256
10	0,89	0,29	134,4	106,2	28,2	554,8300726	2,744
11	0,09	0,49	136,0	107,7	28,3	556,7975551	2,644
12	0,29	0,49	142,6	104,9	37,7	741,7409126	6,756
13	0,49	0,49	157,2	108,7	48,5	954,2290255	17,556
14	0,69	0,49	147,2	105,3	41,9	824,3751788	10,956
15	0,89	0,49	136,1	106,2	29,9	588,2772755	1,044
16	0,09	0,69	134,4	109,1	25,3	497,7730793	5,644
17	0,29	0,69	138,7	106,2	32,5	639,4318212	1,556
18	0,49	0,69	145,6	108,6	37	727,968535	6,056
19	0,69	0,69	139,3	106,3	33	649,2692339	2,056
20	0,89	0,69	134,4	107,9	26,5	521,3828696	4,444
21	0,09	0,89	128,8	105,8	23	452,5209812	7,944
22	0,29	0,89	134,2	107,9	26,3	517,4479046	4,644
23	0,49	0,89	131,5	105,3	26,2	515,480422	4,744
24	0,69	0,89	132,7	107,9	24,8	487,9356667	6,144
25	0,89	0,89	129,3	107,7	21,6	424,9762258	9,344
25					30,944	304,4089	136,92
						CUC (%)	82,30

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	22200	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	21420	g
Volume (Chuva Real)	21,53	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	78,5	L
Intensidade Calculada	980,84	mm h⁻¹
Intensidade Média	294,29	mm h⁻¹
Intensidade Real	269,06	mm h⁻¹
Amostra	1	

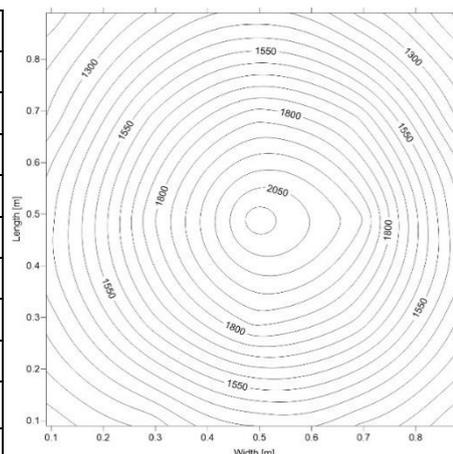


Figura 25 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 294,29 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 5 minutos, 1º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	170,4	111,2	59,2	1164,749656	15,588
2	0,29	0,09	173,5	109,5	64	1259,188817	10,788
3	0,49	0,09	180,6	109,5	71,1	1398,880077	3,688
4	0,69	0,09	177,4	109,1	68,3	1343,790566	6,488
5	0,89	0,09	167,2	106,7	60,5	1190,326929	14,288
6	0,09	0,29	174,3	107,6	66,7	1312,310845	8,088
7	0,29	0,29	189,0	106,7	82,3	1619,23812	7,512
8	0,49	0,29	200,8	106,1	94,7	1863,205953	19,912
9	0,69	0,29	195,0	106,9	88,1	1733,352106	13,312
10	0,89	0,29	176,2	106,2	70	1377,237769	4,788
11	0,09	0,49	177,5	107,7	69,8	1373,302804	4,988
12	0,29	0,49	195,5	104,9	90,6	1782,539169	15,812
13	0,49	0,49	216,9	108,7	108,2	2128,816094	33,412
14	0,69	0,49	205,4	105,3	100,1	1969,450009	25,312
15	0,89	0,49	179,1	106,2	72,9	1434,294762	1,888
16	0,09	0,69	172,6	109,1	63,5	1249,351405	11,288
17	0,29	0,69	187,6	106,2	81,4	1601,530777	6,612
18	0,49	0,69	201,6	108,6	93	1829,75875	18,212
19	0,69	0,69	192,4	106,3	86,1	1694,002456	11,312
20	0,89	0,69	172,5	107,9	64,6	1270,993712	10,188
21	0,09	0,89	162,2	105,8	56,4	1109,660145	18,388
22	0,29	0,89	174,3	107,9	66,4	1306,408398	8,388
23	0,49	0,89	177,0	105,3	71,7	1410,684972	3,088
24	0,69	0,89	173,4	107,9	65,5	1288,701055	9,288
25	0,89	0,89	162,3	107,7	54,6	1074,24546	20,188
25					74,788	294,28817	302,816
						CUC (%)	83,80

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	22200	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	21420	g
Volume (Chuva Real)	21,53	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	78,5	L
Intensidade Calculada	980,84	mm h⁻¹
Intensidade Média	293,78	mm h⁻¹
Intensidade Real	269,06	mm h⁻¹
Amostra	2	

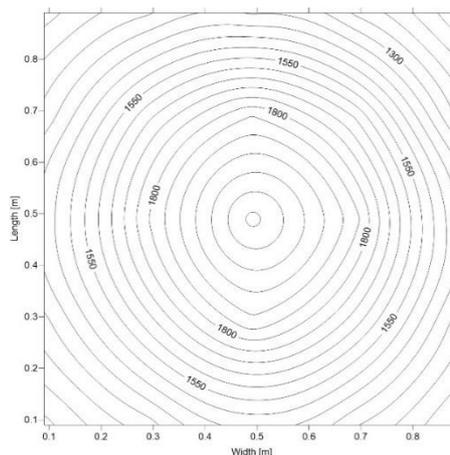


Figura 26 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 293,78 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 5 minutos, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _r (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	171,4	111,2	60,2	1184,424481	14,46
2	0,29	0,09	176,9	109,5	67,4	1326,083223	7,26
3	0,49	0,09	184,0	109,5	74,5	1465,774483	0,16
4	0,69	0,09	177,9	109,1	68,8	1353,627979	5,86
5	0,89	0,09	167,0	106,7	60,3	1186,391964	14,36
6	0,09	0,29	175,4	107,6	67,8	1333,953153	6,86
7	0,29	0,29	189,3	106,7	82,6	1625,140567	7,94
8	0,49	0,29	201,9	106,1	95,8	1884,848261	21,14
9	0,69	0,29	191,6	106,9	84,7	1666,4577	10,04
10	0,89	0,29	173,3	106,2	67,1	1320,180776	7,56
11	0,09	0,49	179,7	107,7	72	1416,587419	2,66
12	0,29	0,49	196,2	104,9	91,3	1796,311547	16,64
13	0,49	0,49	216,3	108,7	107,6	2117,011199	32,94
14	0,69	0,49	200,2	105,3	94,9	1867,140918	20,24
15	0,89	0,49	177,2	106,2	71	1396,912594	3,66
16	0,09	0,69	176,0	109,1	66,9	1316,24581	7,76
17	0,29	0,69	189,3	106,2	83,1	1634,97798	8,44
18	0,49	0,69	202,6	108,6	94	1849,433575	19,34
19	0,69	0,69	189,7	106,3	83,4	1640,880427	8,74
20	0,89	0,69	170,5	107,9	62,6	1231,644062	12,06
21	0,09	0,89	165,7	105,8	59,9	1178,522034	14,76
22	0,29	0,89	173,6	107,9	65,7	1292,63602	8,96
23	0,49	0,89	173,6	105,3	68,3	1343,790566	6,36
24	0,69	0,89	170,9	107,9	63	1239,513992	11,66
25	0,89	0,89	161,3	107,7	53,6	1054,570634	21,06
25					74,66	293,78449	290,92
						CUC (%)	84,41

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	22380	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	21600	g
Volume (Chuva Real)	21,71	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	78,5	L
Intensidade Calculada	980,8413	mm h⁻¹
Intensidade Média	297,326	mm h⁻¹
Intensidade Real	271,32	mm h⁻¹
Amostra	3	

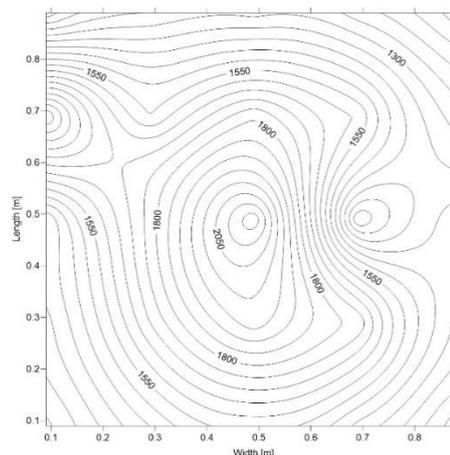


Figura 27 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 297,33 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 5 minutos, 3º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	174,1	111,2	62,9	1237,54651	12,66
2	0,29	0,09	183,2	109,5	73,7	1450,03462	1,86
3	0,49	0,09	189,1	109,5	79,6	1566,11609	4,04
4	0,69	0,09	182,0	109,1	72,9	1434,29476	2,66
5	0,89	0,09	167,9	106,7	61,2	1204,09931	14,36
6	0,09	0,29	175,4	107,6	67,8	1333,95315	7,76
7	0,29	0,29	193,1	106,7	86,4	1699,9049	10,84
8	0,49	0,29	206,6	106,1	100,5	1977,31994	24,94
9	0,69	0,29	197,9	106,9	91	1790,4091	15,44
10	0,89	0,29	176,4	106,2	70,2	1381,17273	5,36
11	0,09	0,49	176,4	107,7	68,7	1351,6605	6,86
12	0,29	0,49	194,8	104,9	89,9	1768,76679	14,34
13	0,49	0,49	219,9	108,7	111,2	2187,84057	35,64
14	0,69	0,49	166,4	105,3	61,1	1202,13182	14,46
15	0,89	0,49	179,3	106,2	73,1	1438,22973	2,46
16	0,09	0,69	210,9	109,1	101,8	2002,89721	26,24
17	0,29	0,69	185,0	106,2	78,8	1550,37623	3,24
18	0,49	0,69	199,6	108,6	91	1790,4091	15,44
19	0,69	0,69	187,4	106,3	81,1	1595,62833	5,54
20	0,89	0,69	172,2	107,9	64,3	1265,09126	11,26
21	0,09	0,89	162,5	105,8	56,7	1115,56259	18,86
22	0,29	0,89	171,5	107,9	63,6	1251,31889	11,96
23	0,49	0,89	170,5	105,3	65,2	1282,79861	10,36
24	0,69	0,89	170,1	107,9	62,2	1223,77413	13,36
25	0,89	0,89	161,8	107,7	54,1	1064,40805	21,46
25					75,56	297,32596	311,4
						CUC (%)	83,52

Anexo D2 – Distribuição espacial das chuvas simuladas – CUC (aspersor ¼” quadrado para área de 1,0 m²)

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	2974	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	2194	g
Volume (Chuva Real)	2,21	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	3,80	L
Intensidade Calculada	237,40	mm h⁻¹
Intensidade Média	168,89	mm h⁻¹
Intensidade Real	137,85	mm h⁻¹
Amostra	1	

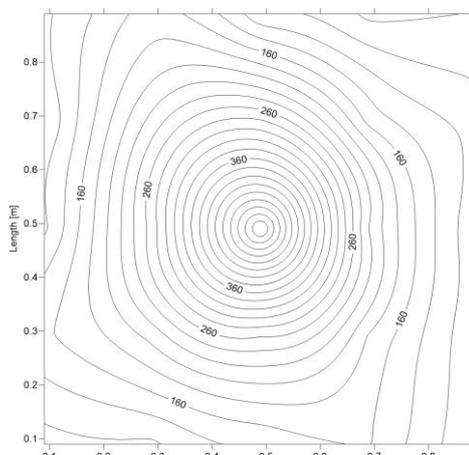


Figura 1 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 168,89 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 1 minuto, 1^o Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	116,9	111,2	5,7	112,146504	2,884
2	0,29	0,09	115,4	109,5	5,9	116,0814691	2,684
3	0,49	0,09	116,8	109,5	7,3	143,6262245	1,284
4	0,69	0,09	117,3	109,1	8,2	161,3335672	0,384
5	0,89	0,09	111,9	106,7	5,2	102,3090914	3,384
6	0,09	0,29	115,6	107,6	8	157,3986022	0,584
7	0,29	0,29	117,2	106,7	10,5	206,5856653	1,916
8	0,49	0,29	119,3	106,1	13,2	259,7076936	4,616
9	0,69	0,29	115,9	106,9	9	177,0734274	0,416
10	0,89	0,29	111,5	106,2	5,3	104,2765739	3,284
11	0,09	0,49	113,6	107,7	5,9	116,0814691	2,684
12	0,29	0,49	118,6	104,9	13,7	269,5451062	5,116
13	0,49	0,49	136,4	108,7	27,7	544,99266	19,116
14	0,69	0,49	116,4	105,3	11,1	218,3905605	2,516
15	0,89	0,49	111,5	106,2	5,3	104,2765739	3,284
16	0,09	0,69	114,3	109,1	5,2	102,3090914	3,384
17	0,29	0,69	117,8	106,2	11,6	228,2279731	3,016
18	0,49	0,69	123,0	108,6	14,4	283,3174839	5,816
19	0,69	0,69	114,1	106,3	7,8	153,4636371	0,784
20	0,89	0,69	113,7	107,9	5,8	114,1139866	2,784
21	0,09	0,89	111,7	105,8	5,9	116,0814691	2,684
22	0,29	0,89	116,6	107,9	8,7	171,1709798	0,116
23	0,49	0,89	110,6	105,3	5,3	104,2765739	3,284
24	0,69	0,89	111,7	107,9	3,8	74,76433602	4,784
25	0,89	0,89	111,8	107,7	4,1	80,6667836	4,484
25					8,584	168,8887001	85,288
						CUC (%)	60,26

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	2944	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	766	g
Massa (H2O Chuva)	2178	g
Volume (Chuva Real)	2,19	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	3,8	L
Intensidade Calculada	237,40	mm h ⁻¹
Intensidade Média	163,69	mm h ⁻¹
Intensidade Real	136,83	mm h ⁻¹
Amostra	2	

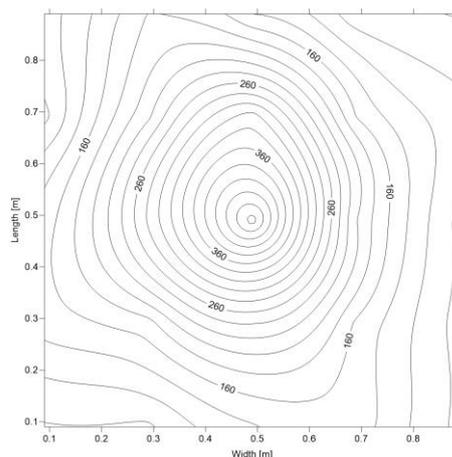


Figura 2 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 163,69 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 1 minuto, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	116,2	111,2	5,0	98,37412635	3,32
2	0,29	0,09	114,4	109,5	4,9	96,40664382	3,42
3	0,49	0,09	116,5	109,5	7	137,7237769	1,32
4	0,69	0,09	116,8	109,1	7,7	151,4961546	0,62
5	0,89	0,09	111,5	106,7	4,8	94,43916129	3,52
6	0,09	0,29	115,2	107,6	7,6	149,528672	0,72
7	0,29	0,29	115,4	106,7	8,7	171,1709798	0,38
8	0,49	0,29	118,3	106,1	12,2	240,0328683	3,88
9	0,69	0,29	114,8	106,9	7,9	155,4311196	0,42
10	0,89	0,29	110,9	106,2	4,7	92,47167876	3,62
11	0,09	0,49	115,3	107,7	7,6	149,528672	0,72
12	0,29	0,49	119,3	104,9	14,4	283,3174839	6,08
13	0,49	0,49	132,6	108,7	23,9	470,2283239	15,58
14	0,69	0,49	115,5	105,3	10,2	200,6832177	1,88
15	0,89	0,49	111,0	106,2	4,8	94,43916129	3,52
16	0,09	0,69	113,9	109,1	4,8	94,43916129	3,52
17	0,29	0,69	117,2	106,2	11	216,423078	2,68
18	0,49	0,69	125,4	108,6	16,8	330,5370645	8,48
19	0,69	0,69	114,4	106,3	8,1	159,3660847	0,22
20	0,89	0,69	113,5	107,9	5,6	110,1790215	2,72
21	0,09	0,89	111,4	105,8	5,6	110,1790215	2,72
22	0,29	0,89	117,1	107,9	9,2	181,0083925	0,88
23	0,49	0,89	112,4	105,3	7,1	139,6912594	1,22
24	0,69	0,89	112,3	107,9	4,4	86,56923118	3,92
25	0,89	0,89	111,7	107,7	4	78,69930108	4,32
25					8,32	163,6945462	79,68
						CUC (%)	61,69

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	2943	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	2163	g
Volume (Chuva Real)	2,18	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	3,8	L
Intensidade Calculada	237,40	mm h ⁻¹
Intensidade Média	160,23	mm h ⁻¹
Intensidade Real	135,88	mm h ⁻¹
Amostra	3	

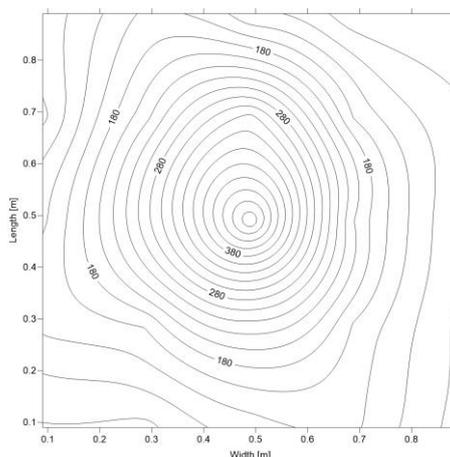


Figura 3 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 160,23 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 1 minuto, 3º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	116,2	111,2	5	98,37412635	3,144
2	0,29	0,09	114,3	109,5	4,8	94,43916129	3,344
3	0,49	0,09	116,1	109,5	6,6	129,8538468	1,544
4	0,69	0,09	116,4	109,1	7,3	143,6262245	0,844
5	0,89	0,09	111,4	106,7	4,7	92,47167876	3,444
6	0,09	0,29	115,0	107,6	7,4	145,593707	0,744
7	0,29	0,29	115,0	106,7	8,3	163,3010497	0,156
8	0,49	0,29	118,0	106,1	11,9	234,1304207	3,756
9	0,69	0,29	114,9	106,9	8	157,3986022	0,144
10	0,89	0,29	111,1	106,2	4,9	96,40664382	3,244
11	0,09	0,49	114,6	107,7	6,9	135,7562944	1,244
12	0,29	0,49	118,8	104,9	13,9	273,4800712	5,756
13	0,49	0,49	133,0	108,7	24,3	478,098254	16,156
14	0,69	0,49	115,4	105,3	10,1	198,7157352	1,956
15	0,89	0,49	111,4	106,2	5,2	102,3090914	2,944
16	0,09	0,69	113,9	109,1	4,8	94,43916129	3,344
17	0,29	0,69	117,1	106,2	10,9	214,4555954	2,756
18	0,49	0,69	125,2	108,6	16,6	326,6020995	8,456
19	0,69	0,69	114,3	106,3	8	157,3986022	0,144
20	0,89	0,69	113,3	107,9	5,4	106,2440565	2,744
21	0,09	0,89	111,3	105,8	5,5	108,211539	2,644
22	0,29	0,89	116,3	107,9	8,4	165,2685323	0,256
23	0,49	0,89	111,5	105,3	6,2	121,9839167	1,944
24	0,69	0,89	112,2	107,9	4,3	84,60174866	3,844
25	0,89	0,89	111,9	107,7	4,2	82,63426613	3,944
25					8,144	160,231777	78,496
						CUC (%)	61,45

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	5115	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	766	g
Massa (H2O Chuva)	4349	g
Volume (Chuva Real)	4,37	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	7,6	L
Intensidade Calculada	237,40	mm h⁻¹
Intensidade Média	159,64	mm h⁻¹
Intensidade Real	136,60	mm h⁻¹
Amostra	1	

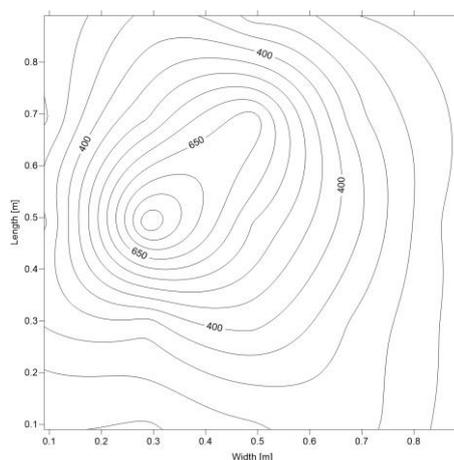


Figura 4 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 159,64 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 2 minutos, 1^o Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	121,4	111,2	10,2	200,683218	6,028
2	0,29	0,09	119,2	109,5	9,7	190,845805	6,528
3	0,49	0,09	121,7	109,5	12,2	240,032868	4,028
4	0,69	0,09	122,9	109,1	13,8	271,512589	2,428
5	0,89	0,09	115,5	106,7	8,8	173,138462	7,428
6	0,09	0,29	122,9	107,6	15,3	301,024827	0,928
7	0,29	0,29	122,8	106,7	16,1	316,764687	0,128
8	0,49	0,29	126,9	106,1	20,8	409,236366	4,572
9	0,69	0,29	121,4	106,9	14,5	285,284966	1,728
10	0,89	0,29	115,3	106,2	9,1	179,04091	7,128
11	0,09	0,49	122,4	107,7	14,7	289,219931	1,528
12	0,29	0,49	147,9	104,9	43	846,017487	26,772
13	0,49	0,49	136,6	108,7	27,9	548,927625	11,672
14	0,69	0,49	123,7	105,3	18,4	362,016785	2,172
15	0,89	0,49	114,8	106,2	8,6	169,203497	7,628
16	0,09	0,69	121,3	109,1	12,2	240,032868	4,028
17	0,29	0,69	131,7	106,2	25,5	501,708044	9,272
18	0,49	0,69	143,2	108,6	34,6	680,748954	18,372
19	0,69	0,69	122,5	106,3	16,2	318,732169	0,028
20	0,89	0,69	117,6	107,9	9,7	190,845805	6,528
21	0,09	0,89	118,7	105,8	12,9	253,805246	3,328
22	0,29	0,89	126,4	107,9	18,5	363,984267	2,272
23	0,49	0,89	119,4	105,3	14,1	277,415036	2,128
24	0,69	0,89	118,1	107,9	10,2	200,683218	6,028
25	0,89	0,89	116,4	107,7	8,7	171,17098	7,528
25					16,228	159,64153	150,208
						CUC (%)	62,98

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	5132	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	4352	g
Volume (Chuva Real)	4,38	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	7,6	L
Intensidade Calculada	237,40	mm h ⁻¹
Intensidade Média	158,50	mm h ⁻¹
Intensidade Real	136,69	mm h ⁻¹
Amostra	2	

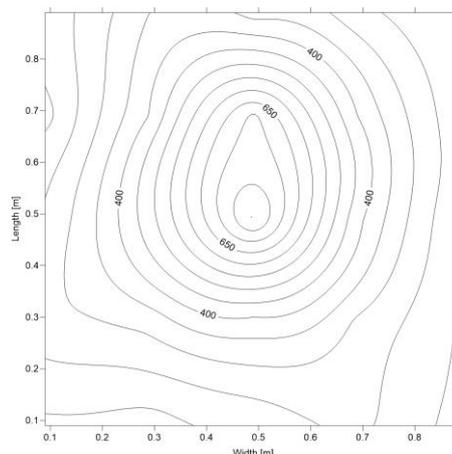


Figura 5 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 158,50 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 2 minutos, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	120,9	111,2	9,7	190,8458051	6,412
2	0,29	0,09	118,5	109,5	9	177,0734274	7,112
3	0,49	0,09	120,4	109,5	10,9	214,4555954	5,212
4	0,69	0,09	122,5	109,1	13,4	263,6426586	2,712
5	0,89	0,09	115,9	106,7	9,2	181,0083925	6,912
6	0,09	0,29	122,2	107,6	14,6	287,2524489	1,512
7	0,29	0,29	122,8	106,7	16,1	316,7646868	0,012
8	0,49	0,29	125,6	106,1	19,5	383,6590927	3,388
9	0,69	0,29	121,6	106,9	14,7	289,2199315	1,412
10	0,89	0,29	116,1	106,2	9,9	194,7807702	6,212
11	0,09	0,49	120,7	107,7	13	255,7727285	3,112
12	0,29	0,49	129,3	104,9	24,4	480,0657366	8,288
13	0,49	0,49	149,7	108,7	41	806,667836	24,888
14	0,69	0,49	126,4	105,3	21,1	415,1388132	4,988
15	0,89	0,49	116,4	106,2	10,2	200,6832177	5,912
16	0,09	0,69	118,4	109,1	9,3	182,975875	6,812
17	0,29	0,69	126,6	106,2	20,4	401,3664355	4,288
18	0,49	0,69	144,7	108,6	36,1	710,2611922	19,988
19	0,69	0,69	126,6	106,3	20,3	399,398953	4,188
20	0,89	0,69	118,8	107,9	10,9	214,4555954	5,212
21	0,09	0,89	116,9	105,8	11,1	218,3905605	5,012
22	0,29	0,89	125,7	107,9	17,8	350,2118898	1,688
23	0,49	0,89	122,1	105,3	16,8	330,5370645	0,688
24	0,69	0,89	121,4	107,9	13,5	265,6101411	2,612
25	0,89	0,89	117,6	107,7	9,9	194,7807702	6,212
25					16,112	158,50039	144,784
						CUC (%)	64,06

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	5120	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	766	g
Massa (H2O Chuva)	4354	g
Volume (Chuva Real)	4,38	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	7,6	L
Intensidade Calculada	237,4011	mm h⁻¹
Intensidade Média	157,0051	mm h⁻¹
Intensidade Real	136,7505	mm h⁻¹
Amostra	3	

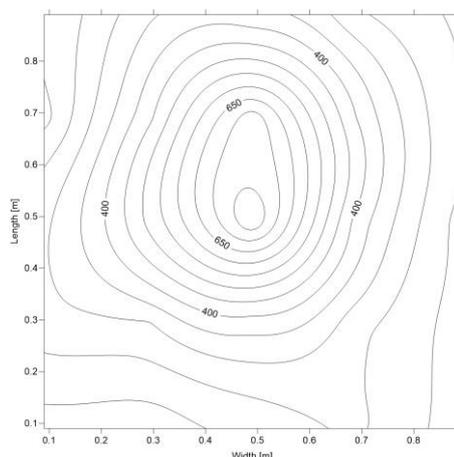


Figura 6 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 157,01 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 2 minutos, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	120,4	111,2	9,2	181,0083925	6,76
2	0,29	0,09	118,1	109,5	8,6	169,2034973	7,36
3	0,49	0,09	120,4	109,5	10,9	214,4555954	5,06
4	0,69	0,09	122,3	109,1	13,2	259,7076936	2,76
5	0,89	0,09	115,7	106,7	9	177,0734274	6,96
6	0,09	0,29	121,9	107,6	14,3	281,3500013	1,66
7	0,29	0,29	121,5	106,7	14,8	291,187414	1,16
8	0,49	0,29	125,0	106,1	18,9	371,8541976	2,94
9	0,69	0,29	120,4	106,9	13,5	265,6101411	2,46
10	0,89	0,29	115,3	106,2	9,1	179,0409099	6,86
11	0,09	0,49	122,4	107,7	14,7	289,2199315	1,26
12	0,29	0,49	130,9	104,9	26	511,545457	10,04
13	0,49	0,49	148,9	108,7	40,2	790,9279758	24,24
14	0,69	0,49	124,7	105,3	19,4	381,6916102	3,44
15	0,89	0,49	115,5	106,2	9,3	182,975875	6,66
16	0,09	0,69	118,4	109,1	9,3	182,975875	6,66
17	0,29	0,69	128,3	106,2	22,1	434,8136384	6,14
18	0,49	0,69	145,7	108,6	37,1	729,9360175	21,14
19	0,69	0,69	126,6	106,3	20,3	399,398953	4,34
20	0,89	0,69	118,1	107,9	10,2	200,6832177	5,76
21	0,09	0,89	116,2	105,8	10,4	204,6181828	5,56
22	0,29	0,89	125,2	107,9	17,3	340,3744772	1,34
23	0,49	0,89	123,8	105,3	18,5	363,9842675	2,54
24	0,69	0,89	121,0	107,9	13,1	257,740211	2,86
25	0,89	0,89	117,3	107,7	9,6	188,8783226	6,36
25					15,96	157,00511	152,32
						CUC (%)	61,82

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	11805	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	11025	g
Volume (Chuva Real)	11,08	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	19	L
Intensidade Calculada	237,40	mm h ⁻¹
Intensidade Média	139,03	mm h ⁻¹
Intensidade Real	138,45	mm h ⁻¹
Amostra	1	

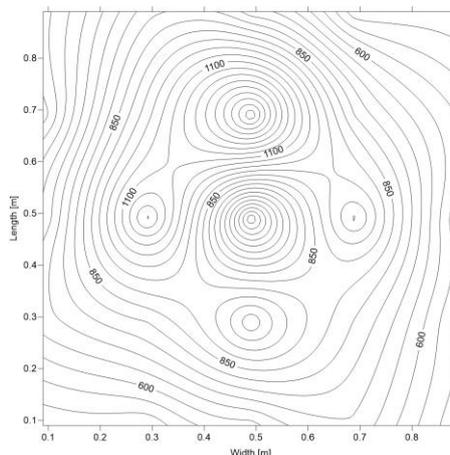


Figura 7 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 139,03 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 5 minutos, 1ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	134,6	111,2	23,4	460,3909113	11,932
2	0,29	0,09	132,7	109,5	23,2	456,4559462	12,132
3	0,49	0,09	138,8	109,5	29,3	576,4723804	6,032
4	0,69	0,09	144,2	109,1	35,1	690,5863669	0,232
5	0,89	0,09	130,0	106,7	23,3	458,4234288	12,032
6	0,09	0,29	142,0	107,6	34,4	676,8139893	0,932
7	0,29	0,29	147,3	106,7	40,6	798,7979059	5,268
8	0,49	0,29	161,7	106,1	55,6	1093,920285	20,268
9	0,69	0,29	147,3	106,9	40,4	794,8629409	5,068
10	0,89	0,29	131,0	106,2	24,8	487,9356667	10,532
11	0,09	0,49	138,4	107,7	30,7	604,0171358	4,632
12	0,29	0,49	169,2	104,9	64,3	1265,091265	28,968
13	0,49	0,49	126,4	108,7	17,7	348,2444073	17,632
14	0,69	0,49	159,3	105,3	54	1062,440565	18,668
15	0,89	0,49	131,8	106,2	25,6	503,6755269	9,732
16	0,09	0,69	130,6	109,1	21,5	423,0087433	13,832
17	0,29	0,69	156,0	106,2	49,8	979,8062984	14,468
18	0,49	0,69	187,1	108,6	78,5	1544,473784	43,168
19	0,69	0,69	146,8	106,3	40,5	796,8304234	5,168
20	0,89	0,69	135,6	107,9	27,7	544,99266	7,632
21	0,09	0,89	130,2	105,8	24,4	480,0657366	10,932
22	0,29	0,89	147,5	107,9	39,6	779,1230807	4,268
23	0,49	0,89	141,9	105,3	36,6	720,0986048	1,268
24	0,69	0,89	129,0	107,9	21,1	415,1388132	14,232
25	0,89	0,89	128,9	107,7	21,2	417,1062957	14,132
25					35,332	139,03019	293,16
						CUC (%)	66,81

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	11629	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	766	g
Massa (H2O Chuva)	10863	g
Volume (Chuva Real)	10,92	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	19	L
Intensidade Calculada	237,401083	mm h ⁻¹
Intensidade Média	152,69	mm h ⁻¹
Intensidade Real	136,461424	mm h ⁻¹
Amostra	2	

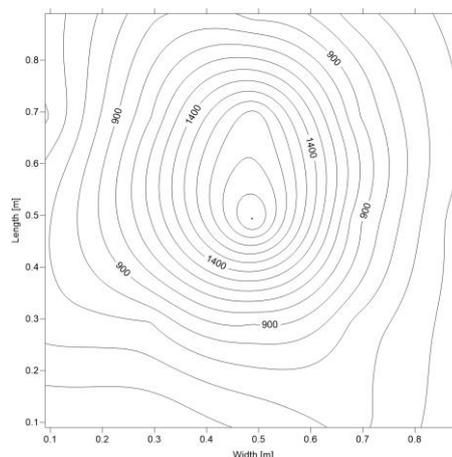


Figura 8 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 152,69 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 5 minutos, 2ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	132,5	111,2	21,3	419,0737782	17,504
2	0,29	0,09	129,9	109,5	20,4	401,3664355	18,404
3	0,49	0,09	135,6	109,5	26,1	513,5129395	12,704
4	0,69	0,09	140,9	109,1	31,8	625,6594436	7,004
5	0,89	0,09	128,5	106,7	21,8	428,9111909	17,004
6	0,09	0,29	140,7	107,6	33,1	651,2367164	5,704
7	0,29	0,29	141,6	106,7	34,9	686,6514019	3,904
8	0,49	0,29	151,8	106,1	45,7	899,1395148	6,896
9	0,69	0,29	140,6	106,9	33,7	663,0416116	5,104
10	0,89	0,29	128,8	106,2	22,6	444,6510511	16,204
11	0,09	0,49	142,3	107,7	34,6	680,7489543	4,204
12	0,29	0,49	165,3	104,9	60,4	1188,359446	21,596
13	0,49	0,49	211,3	108,7	102,6	2018,637073	63,796
14	0,69	0,49	152,4	105,3	47,1	926,6842702	8,296
15	0,89	0,49	128,5	106,2	22,3	438,7486035	16,504
16	0,09	0,69	133,5	109,1	24,4	480,0657366	14,404
17	0,29	0,69	161,4	106,2	55,2	1086,050355	16,396
18	0,49	0,69	198,5	108,6	89,9	1768,766792	51,096
19	0,69	0,69	152,9	106,3	46,6	916,8468575	7,796
20	0,89	0,69	132,6	107,9	24,7	485,9681841	14,104
21	0,09	0,89	133,4	105,8	27,6	543,0251774	11,204
22	0,29	0,89	152,2	107,9	44,3	871,5947594	5,496
23	0,49	0,89	148,9	105,3	43,6	857,8223817	4,796
24	0,69	0,89	140,3	107,9	32,4	637,4643387	6,404
25	0,89	0,89	130,7	107,7	23	452,5209812	15,804
25					38,804	152,69238	372,328
						CUC (%)	61,62

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	11741	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	10961	g
Volume (Chuva Real)	11,02	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	19	L
Intensidade Calculada	237,4011	mm h⁻¹
Intensidade Média	154,2192	mm h⁻¹
Intensidade Real	137,693	mm h⁻¹
Amostra	3	

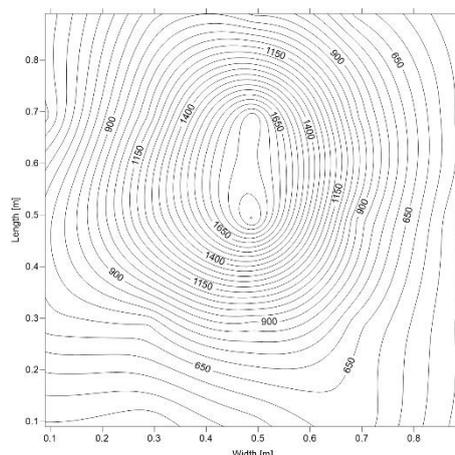


Figura 9 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 154,22 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 5 minutos, 3º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	133,7	111,2	22,5	442,6835686	16,692
2	0,29	0,09	130,1	109,5	20,6	405,3014005	18,592
3	0,49	0,09	136,0	109,5	26,5	521,3828696	12,692
4	0,69	0,09	141,6	109,1	32,5	639,4318212	6,692
5	0,89	0,09	128,5	106,7	21,8	428,9111909	17,392
6	0,09	0,29	142,0	107,6	34,4	676,8139893	4,792
7	0,29	0,29	142,5	106,7	35,8	704,3587446	3,392
8	0,49	0,29	151,2	106,1	45,1	887,3346196	5,908
9	0,69	0,29	140,9	106,9	34	668,9440591	5,192
10	0,89	0,29	128,5	106,2	22,3	438,7486035	16,892
11	0,09	0,49	144,6	107,7	36,9	726,0010524	2,292
12	0,29	0,49	169,1	104,9	64,2	1263,123782	25,008
13	0,49	0,49	205,9	108,7	97,2	1912,393016	58,008
14	0,69	0,49	150,8	105,3	45,5	895,2045497	6,308
15	0,89	0,49	128,3	106,2	22,1	434,8136384	17,092
16	0,09	0,69	133,5	109,1	24,4	480,0657366	14,792
17	0,29	0,69	162,7	106,2	56,5	1111,627628	17,308
18	0,49	0,69	202,3	108,6	93,7	1843,531128	54,508
19	0,69	0,69	155,1	106,3	48,8	960,1314731	9,608
20	0,89	0,69	132,3	107,9	24,4	480,0657366	14,792
21	0,09	0,89	131,9	105,8	26,1	513,5129395	13,092
22	0,29	0,89	152,3	107,9	44,4	873,5622419	5,208
23	0,49	0,89	150,4	105,3	45,1	887,3346196	5,908
24	0,69	0,89	140,0	107,9	32,1	631,5618911	7,092
25	0,89	0,89	130,6	107,7	22,9	450,5534987	16,292
25					39,192	154,21915	375,544
						CUC (%)	61,67

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	3101	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	766	g
Massa (H2O Chuva)	2335	g
Volume (Chuva Real)	2,35	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	4,48	L
Intensidade Calculada	279,88	mm h ⁻¹
Intensidade Média	169,28	mm h ⁻¹
Intensidade Real	146,68	mm h ⁻¹
Amostra	1	

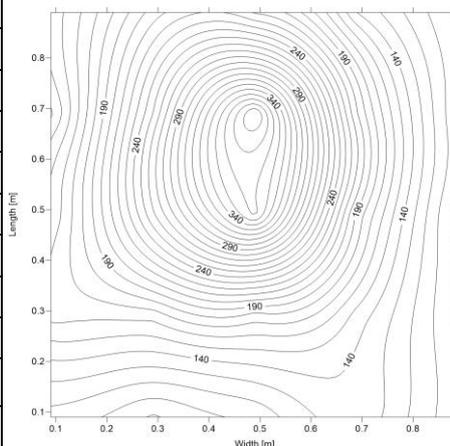


Figura 10 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 169,28 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 1 minuto, 1º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	117,1	111,2	5,9	116,0814691	2,704
2	0,29	0,09	114,5	109,5	5	98,37412635	3,604
3	0,49	0,09	115,2	109,5	5,7	112,146504	2,904
4	0,69	0,09	116,2	109,1	7,1	139,6912594	1,504
5	0,89	0,09	111,9	106,7	5,2	102,3090914	3,404
6	0,09	0,29	115,9	107,6	8,3	163,3010497	0,304
7	0,29	0,29	115,0	106,7	8,3	163,3010497	0,304
8	0,49	0,29	115,0	106,1	8,9	175,1059449	0,296
9	0,69	0,29	114,3	106,9	7,4	145,593707	1,204
10	0,89	0,29	111,2	106,2	5	98,37412635	3,604
11	0,09	0,49	115,4	107,7	7,7	151,4961546	0,904
12	0,29	0,49	118,0	104,9	13,1	257,740211	4,496
13	0,49	0,49	127,1	108,7	18,4	362,0167849	9,796
14	0,69	0,49	114,8	105,3	9,5	186,9108401	0,896
15	0,89	0,49	111,0	106,2	4,8	94,43916129	3,804
16	0,09	0,69	115,6	109,1	6,5	127,8863642	2,104
17	0,29	0,69	118,9	106,2	12,7	249,8702809	4,096
18	0,49	0,69	128,5	108,6	19,9	391,5290229	11,296
19	0,69	0,69	116,5	106,3	10,2	200,6832177	1,596
20	0,89	0,69	113,0	107,9	5,1	100,3416089	3,504
21	0,09	0,89	113,1	105,8	7,3	143,6262245	1,304
22	0,29	0,89	118,3	107,9	10,4	204,6181828	1,796
23	0,49	0,89	115,9	105,3	10,6	208,5531479	1,996
24	0,69	0,89	115,0	107,9	7,1	139,6912594	1,504
25	0,89	0,89	112,7	107,7	5	98,37412635	3,604
25					8,604	169,2822	72,528
						CUC (%)	66,28

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	3106	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	2326	g
Volume (Chuva Real)	2,34	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	4,48	L
Intensidade Calculada	279,88	mm h ⁻¹
Intensidade Média	168,18	mm h ⁻¹
Intensidade Real	146,11	mm h ⁻¹
Amostra	2	

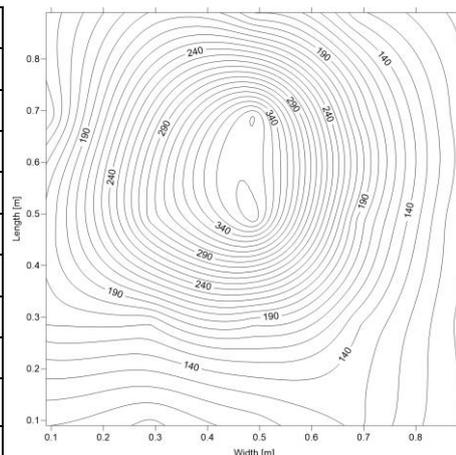


Figura 11 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 168,18 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 1 minuto, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	116,8	111,2	5,6	110,179022	2,948
2	0,29	0,09	114,4	109,5	4,9	96,4066438	3,648
3	0,49	0,09	115,3	109,5	5,8	114,113987	2,748
4	0,69	0,09	115,8	109,1	6,7	131,821329	1,848
5	0,89	0,09	111,7	106,7	5	98,3741263	3,548
6	0,09	0,29	115,8	107,6	8,2	161,333567	0,348
7	0,29	0,29	114,9	106,7	8,2	161,333567	0,348
8	0,49	0,29	115,4	106,1	9,3	182,975875	0,752
9	0,69	0,29	114,1	106,9	7,2	141,658742	1,348
10	0,89	0,29	111,1	106,2	4,9	96,4066438	3,648
11	0,09	0,49	116,4	107,7	8,7	171,17098	0,152
12	0,29	0,49	119,8	104,9	14,9	293,154897	6,352
13	0,49	0,49	127,8	108,7	19,1	375,789163	10,552
14	0,69	0,49	114,8	105,3	9,5	186,91084	0,952
15	0,89	0,49	111,2	106,2	5	98,3741263	3,548
16	0,09	0,69	115,7	109,1	6,6	129,853847	1,948
17	0,29	0,69	119,7	106,2	13,5	265,610141	4,952
18	0,49	0,69	127,5	108,6	18,9	371,854198	10,352
19	0,69	0,69	116,1	106,3	9,8	192,813288	1,252
20	0,89	0,69	113,1	107,9	5,2	102,309091	3,348
21	0,09	0,89	113,1	105,8	7,3	143,626224	1,248
22	0,29	0,89	117,6	107,9	9,7	190,845805	1,152
23	0,49	0,89	113,9	105,3	8,6	169,203497	0,052
24	0,69	0,89	114,1	107,9	6,2	121,983917	2,348
25	0,89	0,89	112,6	107,7	4,9	96,4066438	3,648
25					8,548	168,18041	73,04
						CUC (%)	65,82

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	3067	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	766	g
Massa (H2O Chuva)	2301	g
Volume (Chuva Real)	2,31	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	4,48	L
Intensidade Calculada	279,8834	mm h ⁻¹
Intensidade Média	165,5833	mm h ⁻¹
Intensidade Real	144,5386	mm h ⁻¹
Amostra	3	

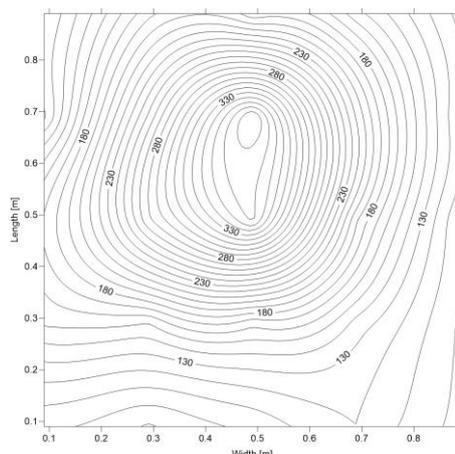


Figura 12 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 165,58 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 1 minuto, 3ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	116,4	111,2	5,2	102,3090914	3,216
2	0,29	0,09	114,0	109,5	4,5	88,53671371	3,916
3	0,49	0,09	114,7	109,5	5,2	102,3090914	3,216
4	0,69	0,09	115,2	109,1	6,1	120,0164341	2,316
5	0,89	0,09	111,6	106,7	4,9	96,40664382	3,516
6	0,09	0,29	115,3	107,6	7,7	151,4961546	0,716
7	0,29	0,29	114,3	106,7	7,6	149,528672	0,816
8	0,49	0,29	114,4	106,1	8,3	163,3010497	0,116
9	0,69	0,29	113,8	106,9	6,9	135,7562944	1,516
10	0,89	0,29	111,2	106,2	5	98,37412635	3,416
11	0,09	0,49	116,4	107,7	8,7	171,1709798	0,284
12	0,29	0,49	119,0	104,9	14,1	277,4150363	5,684
13	0,49	0,49	127,1	108,7	18,4	362,0167849	9,984
14	0,69	0,49	115,0	105,3	9,7	190,8458051	1,284
15	0,89	0,49	111,3	106,2	5,1	100,3416089	3,316
16	0,09	0,69	115,1	109,1	6	118,0489516	2,416
17	0,29	0,69	119,0	106,2	12,8	251,8377634	4,384
18	0,49	0,69	128,0	108,6	19,4	381,6916102	10,984
19	0,69	0,69	117,4	106,3	11,1	218,3905605	2,684
20	0,89	0,69	113,5	107,9	5,6	110,1790215	2,816
21	0,09	0,89	111,9	105,8	6,1	120,0164341	2,316
22	0,29	0,89	117,4	107,9	9,5	186,9108401	1,084
23	0,49	0,89	114,6	105,3	9,3	182,975875	0,884
24	0,69	0,89	115,7	107,9	7,8	153,4636371	0,616
25	0,89	0,89	113,1	107,7	5,4	106,2440565	3,016
25					8,416	165,583329	74,512
						CUC (%)	64,59

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	5487	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	4707	g
Volume (Chuva Real)	4,73	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	8,96	L
Intensidade Calculada	279,88	mm h ⁻¹
Intensidade Média	165,07	mm h ⁻¹
Intensidade Real	147,82	mm h ⁻¹
Amostra	1	

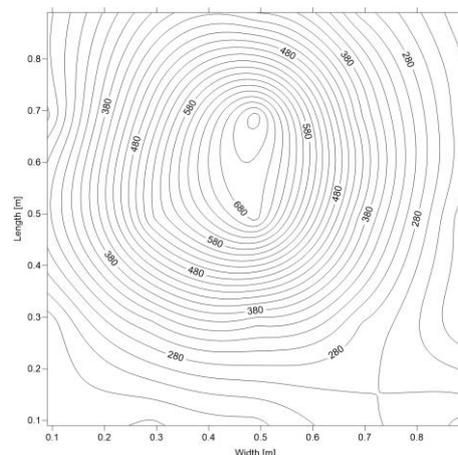


Figura 13 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 165,07 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 2 minutos, 1º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	122,1	111,2	10,9	214,4555954	5,88
2	0,29	0,09	119,4	109,5	9,9	194,7807702	6,88
3	0,49	0,09	120,3	109,5	10,8	212,4881129	5,98
4	0,69	0,09	122,1	109,1	13	255,7727285	3,78
5	0,89	0,09	121,3	106,7	14,6	287,2524489	2,18
6	0,09	0,29	118,1	107,6	10,5	206,5856653	6,28
7	0,29	0,29	122,8	106,7	16,1	316,7646868	0,68
8	0,49	0,29	123,7	106,1	17,6	346,2769247	0,82
9	0,69	0,29	121,2	106,9	14,3	281,3500013	2,48
10	0,89	0,29	116,4	106,2	10,2	200,6832177	6,58
11	0,09	0,49	122,6	107,7	14,9	293,1548965	1,88
12	0,29	0,49	132,1	104,9	27,2	535,1552473	10,42
13	0,49	0,49	143,6	108,7	34,9	686,6514019	18,12
14	0,69	0,49	125,3	105,3	20	393,4965054	3,22
15	0,89	0,49	116,7	106,2	10,5	206,5856653	6,28
16	0,09	0,69	121,0	109,1	11,9	234,1304207	4,88
17	0,29	0,69	131,4	106,2	25,2	495,8055968	8,42
18	0,49	0,69	145,8	108,6	37,2	731,9035	20,42
19	0,69	0,69	126,9	106,3	20,6	405,3014005	3,82
20	0,89	0,69	119,3	107,9	11,4	224,2930081	5,38
21	0,09	0,89	118,7	105,8	12,9	253,805246	3,88
22	0,29	0,89	127,2	107,9	19,3	379,7241277	2,52
23	0,49	0,89	125,6	105,3	20,3	399,398953	3,52
24	0,69	0,89	122,8	107,9	14,9	293,1548965	1,88
25	0,89	0,89	118,1	107,7	10,4	204,6181828	6,38
25					16,78	165,07178	142,56
						CUC (%)	66,02

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	5436	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	4656	g
Volume (Chuva Real)	4,68	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	8,96	L
Intensidade Calculada	279,88	mm h ⁻¹
Intensidade Média	163,69	mm h ⁻¹
Intensidade Real	146,22	mm h ⁻¹
Amostra	2	

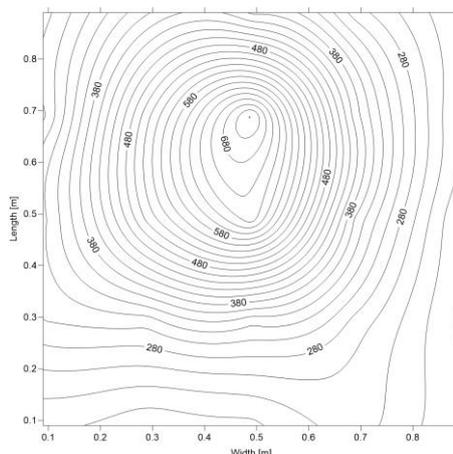


Figura 14 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 163,69 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 2 minutos, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	122,6	111,2	11,4	224,2930081	5,24
2	0,29	0,09	119,9	109,5	10,4	204,6181828	6,24
3	0,49	0,09	120,4	109,5	10,9	214,4555954	5,74
4	0,69	0,09	121,9	109,1	12,8	251,8377634	3,84
5	0,89	0,09	117,1	106,7	10,4	204,6181828	6,24
6	0,09	0,29	122,8	107,6	15,2	299,0573441	1,44
7	0,29	0,29	122,3	106,7	15,6	306,9272742	1,04
8	0,49	0,29	122,6	106,1	16,5	324,6346169	0,14
9	0,69	0,29	120,7	106,9	13,8	271,5125887	2,84
10	0,89	0,29	116,2	106,2	10	196,7482527	6,64
11	0,09	0,49	123,7	107,7	16	314,7972043	0,64
12	0,29	0,49	130,6	104,9	25,7	505,6430094	9,06
13	0,49	0,49	141,8	108,7	33,1	651,2367164	16,46
14	0,69	0,49	123,4	105,3	18,1	356,1143374	1,46
15	0,89	0,49	116,4	106,2	10,2	200,6832177	6,44
16	0,09	0,69	123,1	109,1	14	275,4475538	2,64
17	0,29	0,69	132,3	106,2	26,1	513,5129395	9,46
18	0,49	0,69	145,4	108,6	36,8	724,0335699	20,16
19	0,69	0,69	126,1	106,3	19,8	389,5615403	3,16
20	0,89	0,69	119,0	107,9	11,1	218,3905605	5,54
21	0,09	0,89	119,6	105,8	13,8	271,5125887	2,84
22	0,29	0,89	127,1	107,9	19,2	377,7566452	2,56
23	0,49	0,89	124,4	105,3	19,1	375,7891626	2,46
24	0,69	0,89	122,6	107,9	14,7	289,2199315	1,94
25	0,89	0,89	119,0	107,7	11,3	222,3255255	5,34
25					16,64	163,694546	129,56
						CUC (%)	68,86

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	5474	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	4694	g
Volume (Chuva Real)	4,72	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	8,96	L
Intensidade Calculada	279,8834	mm h ⁻¹
Intensidade Média	165,3079	mm h ⁻¹
Intensidade Real	147,4167	mm h ⁻¹
Amostra	3	

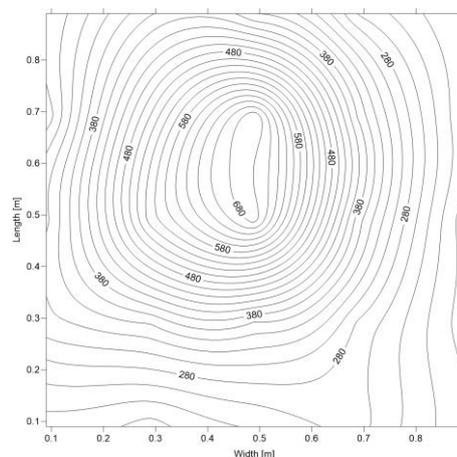


Figura 15 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 165,31 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 2 minutos, 3ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	122,9	111,2	11,7	230,195456	5,104
2	0,29	0,09	120,2	109,5	10,7	210,52063	6,104
3	0,49	0,09	121,8	109,5	12,3	242,000351	4,504
4	0,69	0,09	122,7	109,1	13,6	267,577624	3,204
5	0,89	0,09	117,2	106,7	10,5	206,585665	6,304
6	0,09	0,29	123,5	107,6	15,9	312,829722	0,904
7	0,29	0,29	124,0	106,7	17,3	340,374477	0,496
8	0,49	0,29	124,2	106,1	18,1	356,114337	1,296
9	0,69	0,29	120,9	106,9	14	275,447554	2,804
10	0,89	0,29	115,9	106,2	9,7	190,845805	7,104
11	0,09	0,49	123,7	107,7	16	314,797204	0,804
12	0,29	0,49	132,8	104,9	27,9	548,927625	11,096
13	0,49	0,49	143,7	108,7	35	688,618884	18,196
14	0,69	0,49	124,0	105,3	18,7	367,919233	1,896
15	0,89	0,49	115,9	106,2	9,7	190,845805	7,104
16	0,09	0,69	122,6	109,1	13,5	265,610141	3,304
17	0,29	0,69	131,7	106,2	25,5	501,708044	8,696
18	0,49	0,69	144,1	108,6	35,5	698,456297	18,696
19	0,69	0,69	125,4	106,3	19,1	375,789163	2,296
20	0,89	0,69	118,3	107,9	10,4	204,618183	6,404
21	0,09	0,89	120,1	105,8	14,3	281,350001	2,504
22	0,29	0,89	127,1	107,9	19,2	377,756645	2,396
23	0,49	0,89	123,6	105,3	18,3	360,049302	1,496
24	0,69	0,89	121,0	107,9	13,1	257,740211	3,704
25	0,89	0,89	117,8	107,7	10,1	198,715735	6,704
25					16,804	165,30788	133,12
						CUC (%)	68,31

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	12652	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	11872	g
Volume (Chuva Real)	11,93	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	22,4	L
Intensidade Calculada	279,88	mm h⁻¹
Intensidade Média	162,73	mm h⁻¹
Intensidade Real	149,12	mm h⁻¹
Amostra	1	

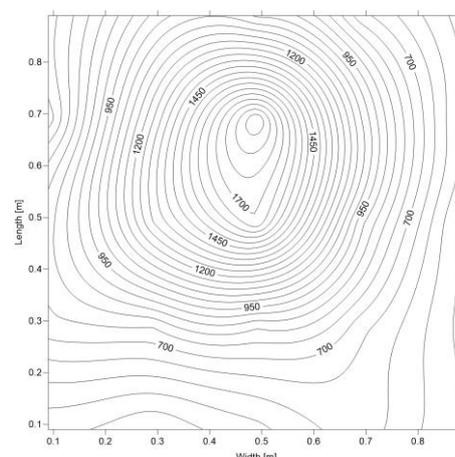


Figura 16 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 162,73 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 5 minutos, 1ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	137,4	111,2	26,2	515,480422	15,156
2	0,29	0,09	132,4	109,5	22,9	450,5534987	18,456
3	0,49	0,09	136,6	109,5	27,1	533,1877648	14,256
4	0,69	0,09	141,3	109,1	32,2	633,5293737	9,156
5	0,89	0,09	132,1	106,7	25,4	499,7405618	15,956
6	0,09	0,29	144,8	107,6	37,2	731,9035	4,156
7	0,29	0,29	145,0	106,7	38,3	753,5458078	3,056
8	0,49	0,29	147,3	106,1	41,2	810,6028011	0,156
9	0,69	0,29	140,9	106,9	34	668,9440591	7,356
10	0,89	0,29	130,5	106,2	24,3	478,098254	17,056
11	0,09	0,49	147,2	107,7	39,5	777,1555981	1,856
12	0,29	0,49	170,8	104,9	65,9	1296,570985	24,544
13	0,49	0,49	194,7	108,7	86	1692,034973	44,644
14	0,69	0,49	152,0	105,3	46,7	918,8143401	5,344
15	0,89	0,49	130,2	106,2	24	472,1958065	17,356
16	0,09	0,69	138,0	109,1	28,9	568,6024503	12,456
17	0,29	0,69	169,3	106,2	63,1	1241,481474	21,744
18	0,49	0,69	205,3	108,6	96,7	1902,555604	55,344
19	0,69	0,69	159,9	106,3	53,6	1054,570634	12,244
20	0,89	0,69	134,7	107,9	26,8	527,2853172	14,556
21	0,09	0,89	137,6	105,8	31,8	625,6594436	9,556
22	0,29	0,89	156,7	107,9	48,8	960,1314731	7,444
23	0,49	0,89	155,6	105,3	50,3	989,643711	8,944
24	0,69	0,89	144,4	107,9	36,5	718,1311223	4,856
25	0,89	0,89	134,2	107,7	26,5	521,3828696	14,856
25					41,356	162,73441	360,504
						CUC (%)	65,13

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	12471	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	11691	g
Volume (Chuva Real)	11,75	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	22,4	L
Intensidade Calculada	279,88	mm h ⁻¹
Intensidade Média	161,82	mm h ⁻¹
Intensidade Real	146,85	mm h ⁻¹
Amostra	2	

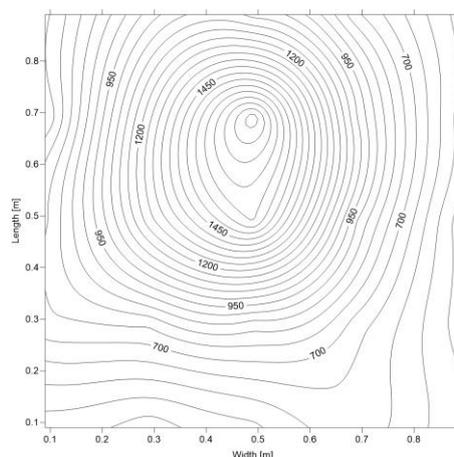


Figura 17 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 161,82 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 5 minutos, 2ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	137,8	111,2	26,6	523,3503522	14,524
2	0,29	0,09	133,4	109,5	23,9	470,2283239	17,224
3	0,49	0,09	136,8	109,5	27,3	537,1227298	13,824
4	0,69	0,09	141,8	109,1	32,7	643,3667863	8,424
5	0,89	0,09	132,9	106,7	26,2	515,480422	14,924
6	0,09	0,29	145,0	107,6	37,4	735,8384651	3,724
7	0,29	0,29	145,3	106,7	38,6	759,4482554	2,524
8	0,49	0,29	148,1	106,1	42	826,3426613	0,876
9	0,69	0,29	141,1	106,9	34,2	672,8790242	6,924
10	0,89	0,29	130,4	106,2	24,2	476,1307715	16,924
11	0,09	0,49	145,3	107,7	37,6	739,7734301	3,524
12	0,29	0,49	167,2	104,9	62,3	1225,741614	21,176
13	0,49	0,49	190,2	108,7	81,5	1603,498259	40,376
14	0,69	0,49	151,0	105,3	45,7	899,1395148	4,576
15	0,89	0,49	130,2	106,2	24	472,1958065	17,124
16	0,09	0,69	139,5	109,1	30,4	598,1146882	10,724
17	0,29	0,69	169,0	106,2	62,8	1235,579027	21,676
18	0,49	0,69	201,9	108,6	93,3	1835,661198	52,176
19	0,69	0,69	157,2	106,3	50,9	1001,448606	9,776
20	0,89	0,69	134,7	107,9	26,8	527,2853172	14,324
21	0,09	0,89	138,2	105,8	32,4	637,4643387	8,724
22	0,29	0,89	157,3	107,9	49,4	971,9363683	8,276
23	0,49	0,89	157,7	105,3	52,4	1030,960844	11,276
24	0,69	0,89	146,5	107,9	38,6	759,4482554	2,524
25	0,89	0,89	134,6	107,7	26,9	529,2527997	14,224
25					41,124	161,8215029	340,368
						CUC (%)	66,89

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	12645	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	11865	g
Volume (Chuva Real)	11,93	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	22,4	L
Intensidade Calculada	279,8834	mm h ⁻¹
Intensidade Média	164,3241	mm h ⁻¹
Intensidade Real	149,0408	mm h ⁻¹
Amostra	3	

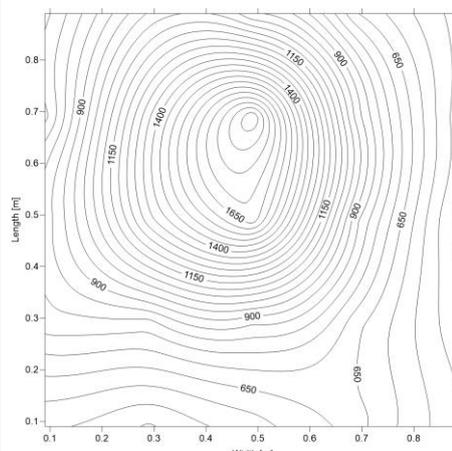


Figura 18 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 164,32 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 5 minutos, 3ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	139,6	111,2	28,4	558,7650376	13,36
2	0,29	0,09	134,5	109,5	25	491,8706317	16,76
3	0,49	0,09	138,7	109,5	29,2	574,5048979	12,56
4	0,69	0,09	143,1	109,1	34	668,9440591	7,76
5	0,89	0,09	132,6	106,7	25,9	509,5779745	15,86
6	0,09	0,29	147,1	107,6	39,5	777,1555981	2,26
7	0,29	0,29	146,2	106,7	39,5	777,1555981	2,26
8	0,49	0,29	149,5	106,1	43,4	853,8874167	1,64
9	0,69	0,29	140,7	106,9	33,8	665,0090941	7,96
10	0,89	0,29	129,5	106,2	23,3	458,4234288	18,46
11	0,09	0,49	149,4	107,7	41,7	820,4402137	0,06
12	0,29	0,49	172,4	104,9	67,5	1328,050706	25,74
13	0,49	0,49	194,0	108,7	85,3	1678,262595	43,54
14	0,69	0,49	149,1	105,3	43,8	861,7573468	2,04
15	0,89	0,49	127,8	106,2	21,6	424,9762258	20,16
16	0,09	0,69	143,8	109,1	34,7	682,7164368	7,06
17	0,29	0,69	174,4	106,2	68,2	1341,823083	26,44
18	0,49	0,69	205,0	108,6	96,4	1896,653156	54,64
19	0,69	0,69	153,5	106,3	47,2	928,6517527	5,44
20	0,89	0,69	131,6	107,9	23,7	466,2933589	18,06
21	0,09	0,89	140,6	105,8	34,8	684,6839194	6,96
22	0,29	0,89	159,1	107,9	51,2	1007,351054	9,44
23	0,49	0,89	153,8	105,3	48,5	954,2290255	6,74
24	0,69	0,89	141,1	107,9	33,2	653,2041989	8,56
25	0,89	0,89	131,9	107,7	24,2	476,1307715	17,56
25					41,76	164,32414	351,32
						CUC (%)	66,35

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	3374	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	2594	g
Volume (Chuva Real)	2,61	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	5,4	L
Intensidade Calculada	337,36	mm h ⁻¹
Intensidade Média	182,50	mm h ⁻¹
Intensidade Real	162,93	mm h ⁻¹
Amostra	1	

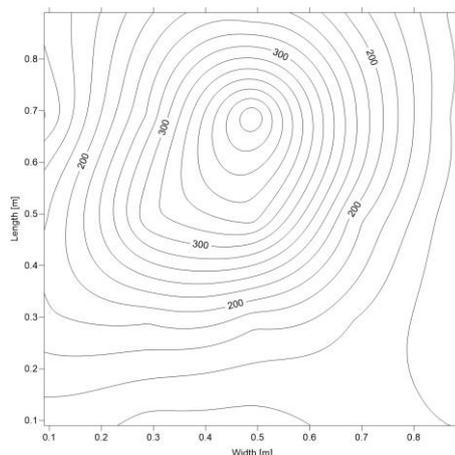


Figura 19 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 182,50 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 1 minuto, 1ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	117,8	111,2	6,6	129,8538468	2,68
2	0,29	0,09	115,2	109,5	5,7	112,146504	3,58
3	0,49	0,09	115,2	109,5	5,7	112,146504	3,58
4	0,69	0,09	115,5	109,1	6,4	125,9188817	2,88
5	0,89	0,09	112,8	106,7	6,1	120,0164341	3,18
6	0,09	0,29	116,5	107,6	8,9	175,1059449	0,38
7	0,29	0,29	115,9	106,7	9,2	181,0083925	0,08
8	0,49	0,29	114,5	106,1	8,4	165,2685323	0,88
9	0,69	0,29	113,9	106,9	7	137,7237769	2,28
10	0,89	0,29	111,4	106,2	5,2	102,3090914	4,08
11	0,09	0,49	116,7	107,7	9	177,0734274	0,28
12	0,29	0,49	120,8	104,9	15,9	312,8297218	6,62
13	0,49	0,49	126,3	108,7	17,6	346,2769247	8,32
14	0,69	0,49	114,8	105,3	9,5	186,9108401	0,22
15	0,89	0,49	111,4	106,2	5,2	102,3090914	4,08
16	0,09	0,69	115,1	109,1	6	118,0489516	3,28
17	0,29	0,69	119,6	106,2	13,4	263,6426586	4,12
18	0,49	0,69	130,9	108,6	22,3	438,7486035	13,02
19	0,69	0,69	118,5	106,3	12,2	240,0328683	2,92
20	0,89	0,69	113,5	107,9	5,6	110,1790215	3,68
21	0,09	0,89	113,1	105,8	7,3	143,6262245	1,98
22	0,29	0,89	118,9	107,9	11	216,423078	1,72
23	0,49	0,89	117,8	105,3	12,5	245,9353159	3,22
24	0,69	0,89	117,5	107,9	9,6	188,8783226	0,32
25	0,89	0,89	113,3	107,7	5,6	110,1790215	3,68
25					9,276	182,503679	81,032
						CUC (%)	65,06

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	3419	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	2639	g
Volume (Chuva Real)	2,65	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	5,4	L
Intensidade Calculada	337,36	mm h ⁻¹
Intensidade Média	184,24	mm h ⁻¹
Intensidade Real	165,75	mm h ⁻¹
Amostra	2	

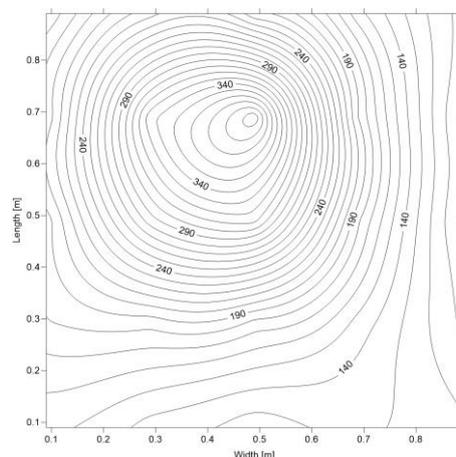


Figura 20 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 184,24 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 1 minuto, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	119,0	111,2	7,8	153,4636371	1,564
2	0,29	0,09	116,4	109,5	6,9	135,7562944	2,464
3	0,49	0,09	115,8	109,5	6,3	123,9513992	3,064
4	0,69	0,09	115,9	109,1	6,8	133,7888118	2,564
5	0,89	0,09	112,9	106,7	6,2	121,9839167	3,164
6	0,09	0,29	116,7	107,6	9,1	179,0409099	0,264
7	0,29	0,29	116,0	106,7	9,3	182,975875	0,064
8	0,49	0,29	115,0	106,1	8,9	175,1059449	0,464
9	0,69	0,29	114,3	106,9	7,4	145,593707	1,964
10	0,89	0,29	111,7	106,2	5,5	108,211539	3,864
11	0,09	0,49	117,1	107,7	9,4	184,9433575	0,036
12	0,29	0,49	119,4	104,9	14,5	285,2849664	5,136
13	0,49	0,49	124,6	108,7	15,9	312,8297218	6,536
14	0,69	0,49	114,5	105,3	9,2	181,0083925	0,164
15	0,89	0,49	111,2	106,2	5	98,37412635	4,364
16	0,09	0,69	118,9	109,1	9,8	192,8132876	0,436
17	0,29	0,69	123,3	106,2	17,1	336,4395121	7,736
18	0,49	0,69	128,8	108,6	20,2	397,4314704	10,836
19	0,69	0,69	115,9	106,3	9,6	188,8783226	0,236
20	0,89	0,69	112,9	107,9	5	98,37412635	4,364
21	0,09	0,89	114,5	105,8	8,7	171,1709798	0,664
22	0,29	0,89	119,4	107,9	11,5	226,2604906	2,136
23	0,49	0,89	116,1	105,3	10,8	212,4881129	1,436
24	0,69	0,89	115,7	107,9	7,8	153,4636371	1,564
25	0,89	0,89	113,1	107,7	5,4	106,2440565	3,964
25					9,364	184,23506	69,048
						CUC (%)	70,50

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	3366	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	2586	g
Volume (Chuva Real)	2,60	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	5,4	L
Intensidade Calculada	337,3594	mm h ⁻¹
Intensidade Média	178,4113	mm h ⁻¹
Intensidade Real	162,4165	mm h ⁻¹
Amostra	3	

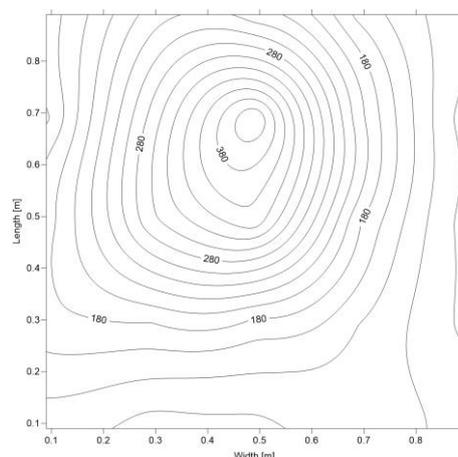


Figura 21 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 178,41 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 1 minuto, 3º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	117,8	111,2	6,6	129,8538468	2,468
2	0,29	0,09	115,1	109,5	5,6	110,1790215	3,468
3	0,49	0,09	115,3	109,5	5,8	114,1139866	3,268
4	0,69	0,09	115,8	109,1	6,7	131,8213293	2,368
5	0,89	0,09	112,6	106,7	5,9	116,0814691	3,168
6	0,09	0,29	116,4	107,6	8,8	173,1384624	0,268
7	0,29	0,29	115,7	106,7	9	177,0734274	0,068
8	0,49	0,29	114,8	106,1	8,7	171,1709798	0,368
9	0,69	0,29	114,0	106,9	7,1	139,6912594	1,968
10	0,89	0,29	111,1	106,2	4,9	96,40664382	4,168
11	0,09	0,49	116,4	107,7	8,7	171,1709798	0,368
12	0,29	0,49	119,8	104,9	14,9	293,1548965	5,832
13	0,49	0,49	126,6	108,7	17,9	352,1793723	8,832
14	0,69	0,49	114,6	105,3	9,3	182,975875	0,232
15	0,89	0,49	111,0	106,2	4,8	94,43916129	4,268
16	0,09	0,69	116,0	109,1	6,9	135,7562944	2,168
17	0,29	0,69	120,7	106,2	14,5	285,2849664	5,432
18	0,49	0,69	130,0	108,6	21,4	421,0412608	12,332
19	0,69	0,69	116,9	106,3	10,6	208,5531479	1,532
20	0,89	0,69	112,6	107,9	4,7	92,47167876	4,368
21	0,09	0,89	113,4	105,8	7,6	149,528672	1,468
22	0,29	0,89	119,5	107,9	11,6	228,2279731	2,532
23	0,49	0,89	116,9	105,3	11,6	228,2279731	2,532
24	0,69	0,89	115,7	107,9	7,8	153,4636371	1,268
25	0,89	0,89	113,0	107,7	5,3	104,2765739	3,768
25					9,068	178,411316	78,512
						CUC (%)	65,37

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	6134	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	5354	g
Volume (Chuva Real)	5,38	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	10,8	L
Intensidade Calculada	337,36	mm h ⁻¹
Intensidade Média	183,92	mm h ⁻¹
Intensidade Real	168,13	mm h ⁻¹
Amostra	1	

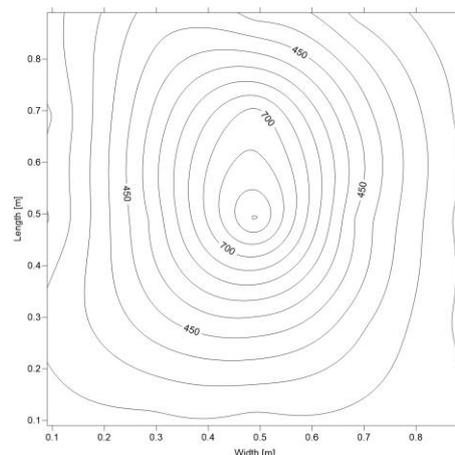


Figura 22 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 183,92 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 2 minutos, 1ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	125,2	111,2	14,0	275,4475538	4,696
2	0,29	0,09	123,8	109,5	14,3	281,3500013	4,396
3	0,49	0,09	123,6	109,5	14,1	277,4150363	4,596
4	0,69	0,09	123,5	109,1	14,4	283,3174839	4,296
5	0,89	0,09	119,9	106,7	13,2	259,7076936	5,496
6	0,09	0,29	123,5	107,6	15,9	312,8297218	2,796
7	0,29	0,29	128,3	106,7	21,6	424,9762258	2,904
8	0,49	0,29	130,7	106,1	24,6	484,0007016	5,904
9	0,69	0,29	125,4	106,9	18,5	363,9842675	0,196
10	0,89	0,29	118,3	106,2	12,1	238,0653858	6,596
11	0,09	0,49	120,2	107,7	12,5	245,9353159	6,196
12	0,29	0,49	130,7	104,9	25,8	507,6104919	7,104
13	0,49	0,49	152,4	108,7	43,7	859,7898643	25,004
14	0,69	0,49	127,3	105,3	22	432,8461559	3,304
15	0,89	0,49	118,1	106,2	11,9	234,1304207	6,796
16	0,09	0,69	121,3	109,1	12,2	240,0328683	6,496
17	0,29	0,69	131,7	106,2	25,5	501,7080444	6,804
18	0,49	0,69	145,7	108,6	37,1	729,9360175	18,404
19	0,69	0,69	128,4	106,3	22,1	434,8136384	3,404
20	0,89	0,69	119,9	107,9	12	236,0979032	6,696
21	0,09	0,89	120,0	105,8	14,2	279,3825188	4,496
22	0,29	0,89	129,2	107,9	21,3	419,0737782	2,604
23	0,49	0,89	124,5	105,3	19,2	377,7566452	0,504
24	0,69	0,89	122,3	107,9	14,4	283,3174839	4,296
25	0,89	0,89	118,5	107,7	10,8	212,4881129	7,896
25					18,696	183,92027	151,88
						CUC (%)	67,51

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	6095	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	5315	g
Volume (Chuva Real)	5,34	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	10,8	L
Intensidade Calculada	337,36	mm h⁻¹
Intensidade Média	184,12	mm h⁻¹
Intensidade Real	166,91	mm h⁻¹
Amostra	2	

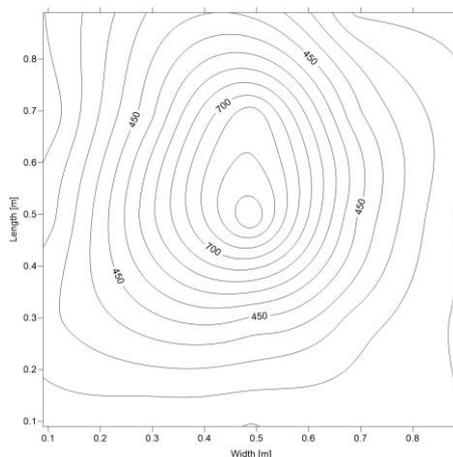


Figura 23 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 184,12 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 2 minutos, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	124,9	111,2	13,7	269,5451062	5,016
2	0,29	0,09	122,5	109,5	13	255,7727285	5,716
3	0,49	0,09	122,0	109,5	12,5	245,9353159	6,216
4	0,69	0,09	123,0	109,1	13,9	273,4800712	4,816
5	0,89	0,09	119,6	106,7	12,9	253,805246	5,816
6	0,09	0,29	124,7	107,6	17,1	336,4395121	1,616
7	0,29	0,29	128,3	106,7	21,6	424,9762258	2,884
8	0,49	0,29	127,8	106,1	21,7	426,9437083	2,984
9	0,69	0,29	123,3	106,9	16,4	322,6671344	2,316
10	0,89	0,29	118,5	106,2	12,3	242,0003508	6,416
11	0,09	0,49	121,4	107,7	13,7	269,5451062	5,016
12	0,29	0,49	134,2	104,9	29,3	576,4723804	10,584
13	0,49	0,49	154,1	108,7	45,4	893,2370672	26,684
14	0,69	0,49	128,3	105,3	23	452,5209812	4,284
15	0,89	0,49	118,5	106,2	12,3	242,0003508	6,416
16	0,09	0,69	119,4	109,1	10,3	202,6507003	8,416
17	0,29	0,69	130,4	106,2	24,2	476,1307715	5,484
18	0,49	0,69	148,8	108,6	40,2	790,9279758	21,484
19	0,69	0,69	127,5	106,3	21,2	417,1062957	2,484
20	0,89	0,69	121,6	107,9	13,7	269,5451062	5,016
21	0,09	0,89	118,4	105,8	12,6	247,9027984	6,116
22	0,29	0,89	128,3	107,9	20,4	401,3664355	1,684
23	0,49	0,89	127,6	105,3	22,3	438,7486035	3,584
24	0,69	0,89	120,2	107,9	12,3	242,0003508	6,416
25	0,89	0,89	119,6	107,7	11,9	234,1304207	6,816
25					18,716	184,11701	164,28
						CUC (%)	64,89

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	6127	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	5347	g
Volume (Chuva Real)	5,38	L
Duração Chuva (min)	2	min
Volume (Chuva Total)	10,8	L
Intensidade Calculada	337,36	mm h⁻¹
Intensidade Média	186,01	mm h⁻¹
Intensidade Real	167,92	mm h⁻¹
Amostra	3	

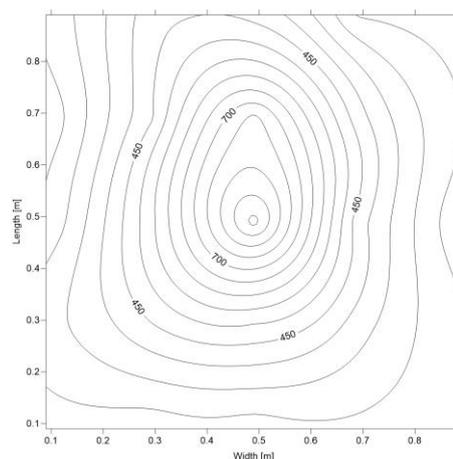


Figura 24 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 186,01 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 2 minutos, 3ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	125,3	111,2	14,1	277,4150363	4,808
2	0,29	0,09	123,1	109,5	13,6	267,5776237	5,308
3	0,49	0,09	123,4	109,5	13,9	273,4800712	5,008
4	0,69	0,09	123,8	109,1	14,7	289,2199315	4,208
5	0,89	0,09	120,1	106,7	13,4	263,6426586	5,508
6	0,09	0,29	124,5	107,6	16,9	332,504547	2,008
7	0,29	0,29	129,3	106,7	22,6	444,6510511	3,692
8	0,49	0,29	131,3	106,1	25,2	495,8055968	6,292
9	0,69	0,29	125,9	106,9	19	373,8216801	0,092
10	0,89	0,29	119,3	106,2	13,1	257,740211	5,808
11	0,09	0,49	120,7	107,7	13	255,7727285	5,908
12	0,29	0,49	131,9	104,9	27	531,2202823	8,092
13	0,49	0,49	155,4	108,7	46,7	918,8143401	27,792
14	0,69	0,49	126,9	105,3	21,6	424,9762258	2,692
15	0,89	0,49	116,8	106,2	10,6	208,5531479	8,308
16	0,09	0,69	119,8	109,1	10,7	210,5206304	8,208
17	0,29	0,69	128,5	106,2	22,3	438,7486035	3,392
18	0,49	0,69	147,5	108,6	38,9	765,350703	19,992
19	0,69	0,69	127,9	106,3	21,6	424,9762258	2,692
20	0,89	0,69	120,7	107,9	12,8	251,8377634	6,108
21	0,09	0,89	119,2	105,8	13,4	263,6426586	5,508
22	0,29	0,89	129,5	107,9	21,6	424,9762258	2,692
23	0,49	0,89	127,3	105,3	22	432,8461559	3,092
24	0,69	0,89	120,4	107,9	12,5	245,9353159	6,408
25	0,89	0,89	119,2	107,7	11,5	226,2604906	7,408
25					18,908	186,0058	161,024
						CUC (%)	65,94

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	13912	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	13132	g
Volume (Chuva Real)	13,20	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	27	L
Intensidade Calculada	337,36	mm h⁻¹
Intensidade Média	179,42	mm h⁻¹
Intensidade Real	164,95	mm h⁻¹
Amostra	1	

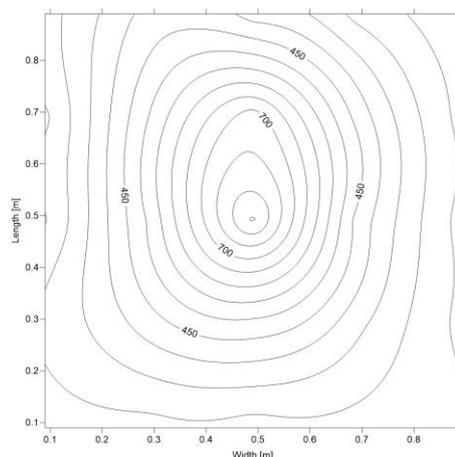


Figura 25 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 179,42 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 5 minutos, 1ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	144,9	111,2	33,7	663,0416116	11,896
2	0,29	0,09	139,6	109,5	30,1	592,2122406	15,496
3	0,49	0,09	138,6	109,5	29,1	572,5374153	16,496
4	0,69	0,09	141,8	109,1	32,7	643,3667863	12,896
5	0,89	0,09	135,9	106,7	29,2	574,5048979	16,396
6	0,09	0,29	150,9	107,6	43,3	851,9199341	2,296
7	0,29	0,29	152,7	106,7	46	905,0419624	0,404
8	0,49	0,29	149,9	106,1	43,8	861,7573468	1,796
9	0,69	0,29	141,7	106,9	34,8	684,6839194	10,796
10	0,89	0,29	132,5	106,2	26,3	517,4479046	19,296
11	0,09	0,49	151,3	107,7	43,6	857,8223817	1,996
12	0,29	0,49	176,7	104,9	71,8	1412,652454	26,204
13	0,49	0,49	192,2	108,7	83,5	1642,84791	37,904
14	0,69	0,49	152,5	105,3	47,2	928,6517527	1,604
15	0,89	0,49	131,1	106,2	24,9	489,9031492	20,696
16	0,09	0,69	149,3	109,1	40,2	790,9279758	5,396
17	0,29	0,69	181,4	106,2	75,2	1479,54686	29,604
18	0,49	0,69	211,8	108,6	103,2	2030,441968	57,604
19	0,69	0,69	159,8	106,3	53,5	1052,603152	7,904
20	0,89	0,69	132,9	107,9	25	491,8706317	20,596
21	0,09	0,89	145,5	105,8	39,7	781,0905632	5,896
22	0,29	0,89	164,6	107,9	56,7	1115,562593	11,104
23	0,49	0,89	162,2	105,3	56,9	1119,497558	11,304
24	0,69	0,89	150,1	107,9	42,2	830,2776264	3,396
25	0,89	0,89	135,0	107,7	27,3	537,1227298	18,296
25					45,596	179,41867	367,272
						CUC (%)	67,78

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	13930	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	13150	g
Volume (Chuva Real)	13,22	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	27	L
Intensidade Calculada	337,36	mm h⁻¹
Intensidade Média	179,10	mm h⁻¹
Intensidade Real	165,17	mm h⁻¹
Amostra	2	

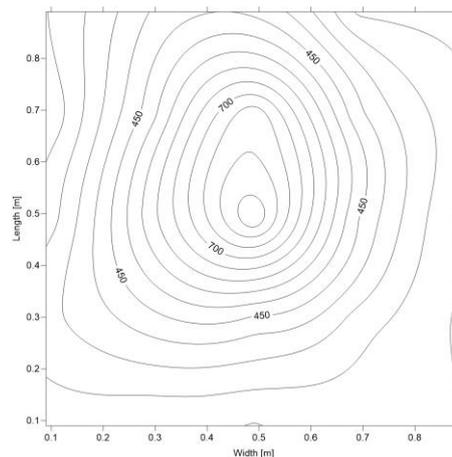


Figura 26 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 179,10 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 5 minutos, 2ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	144,4	111,2	33,2	653,2041989	12,316
2	0,29	0,09	138,5	109,5	29	570,5699328	16,516
3	0,49	0,09	142,3	109,5	32,8	645,3342688	12,716
4	0,69	0,09	137,4	109,1	28,3	556,7975551	17,216
5	0,89	0,09	135,6	106,7	28,9	568,6024503	16,616
6	0,09	0,29	151,6	107,6	44	865,6923118	1,516
7	0,29	0,29	152,4	106,7	45,7	899,1395148	0,184
8	0,49	0,29	148,3	106,1	42,2	830,2776264	3,316
9	0,69	0,29	142,4	106,9	35,5	698,456297	10,016
10	0,89	0,29	131,9	106,2	25,7	505,6430094	19,816
11	0,09	0,49	148,2	107,7	40,5	796,8304234	5,016
12	0,29	0,49	177,8	104,9	72,9	1434,294762	27,384
13	0,49	0,49	191,2	108,7	82,5	1623,173085	36,984
14	0,69	0,49	152,4	105,3	47,1	926,6842702	1,584
15	0,89	0,49	129,9	106,2	23,7	466,2933589	21,816
16	0,09	0,69	143,4	109,1	34,3	674,8465067	11,216
17	0,29	0,69	178,6	106,2	72,4	1424,457349	26,884
18	0,49	0,69	219,2	108,6	110,6	2176,035675	65,084
19	0,69	0,69	160,5	106,3	54,2	1066,37553	8,684
20	0,89	0,69	131,4	107,9	23,5	462,3583938	22,016
21	0,09	0,89	146,3	105,8	40,5	796,8304234	5,016
22	0,29	0,89	168,1	107,9	60,2	1184,424481	14,684
23	0,49	0,89	167,3	105,3	62	1219,839167	16,484
24	0,69	0,89	150,3	107,9	42,4	834,2125914	3,116
25	0,89	0,89	133,5	107,7	25,8	507,6104919	19,716
25					45,516	179,10387	395,912
						CUC (%)	65,21

Pressão	1,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	16420	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	13934	g
Recipiente Utilizado	2	
Massa (Recipiente)	780	g
Massa (H2O Chuva)	13154	g
Volume (Chuva Real)	13,22	L
Duração Chuva (min)	5	min
Volume (Chuva Total)	27	L
Intensidade Calculada	337,3594	mm h⁻¹
Intensidade Média	179,7177	mm h⁻¹
Intensidade Real	165,2246	mm h⁻¹
Amostra	3	

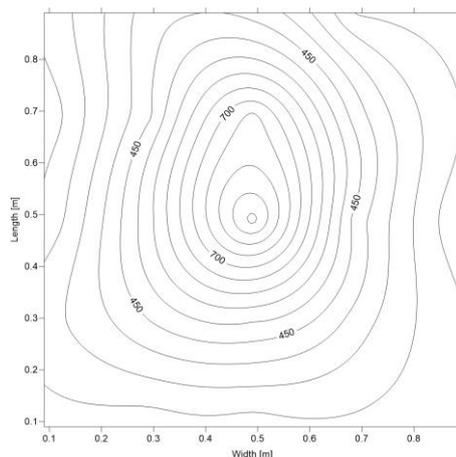


Figura 27 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 179,72 mm/h para pressão de 150 kPa e tempo de 5 minutos, 3ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,09	0,09	144,5	111,2	33,3	655,171681	12,372
2	0,29	0,09	139,1	109,5	29,6	582,374828	16,072
3	0,49	0,09	142,7	109,5	33,2	653,204199	12,472
4	0,69	0,09	138,7	109,1	29,6	582,374828	16,072
5	0,89	0,09	136,2	106,7	29,5	580,407345	16,172
6	0,09	0,29	152,2	107,6	44,6	877,497207	1,072
7	0,29	0,29	153,0	106,7	46,3	910,94441	0,628
8	0,49	0,29	149,3	106,1	43,2	849,952452	2,472
9	0,69	0,29	141,6	106,9	34,7	682,716437	10,972
10	0,89	0,29	131,9	106,2	25,7	505,643009	19,972
11	0,09	0,49	151,2	107,7	43,5	855,854899	2,172
12	0,29	0,49	178,5	104,9	73,6	1448,06714	27,928
13	0,49	0,49	190,1	108,7	81,4	1601,53078	35,728
14	0,69	0,49	150,1	105,3	44,8	881,432172	0,872
15	0,89	0,49	129,5	106,2	23,3	458,423429	22,372
16	0,09	0,69	149,2	109,1	40,1	788,960493	5,572
17	0,29	0,69	183,8	106,2	77,6	1526,76644	31,928
18	0,49	0,69	214,1	108,6	105,5	2075,69407	59,828
19	0,69	0,69	156,6	106,3	50,3	989,643711	4,628
20	0,89	0,69	131,1	107,9	23,2	456,455946	22,472
21	0,09	0,89	148,7	105,8	42,9	844,050004	2,772
22	0,29	0,89	169,6	107,9	61,7	1213,93672	16,028
23	0,49	0,89	163,7	105,3	58,4	1149,0098	12,728
24	0,69	0,89	147,7	107,9	39,8	783,058046	5,872
25	0,89	0,89	133,7	107,7	26	511,545457	19,672
25					45,672	179,71772	378,848
						CUC (%)	66,82

Anexo D3 – Distribuição espacial das chuvas simuladas – CUC (aspersor ¼” quadrado para área de 0,25 m²)

Pressão	0,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	11580,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	12860,00	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	520	g
Massa (H2O Chuva)	1280,00	g
Volume (Chuva Real)	1,282	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	3,30	L
Intensidade Calculada	792,00	mm h⁻¹
Intensidade Média	271,72	mm h⁻¹
Intensidade Real	307,75	mm h⁻¹
Amostra	1	

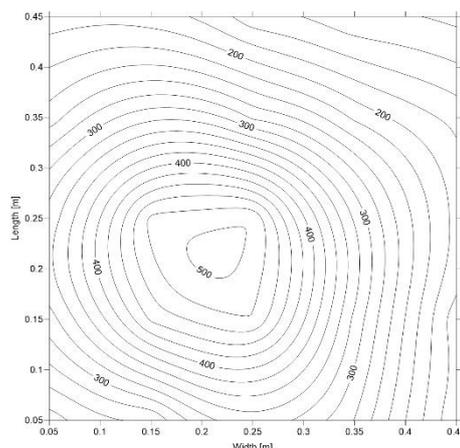


Figura 1 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 271,72 mm/h para pressão de 50 kPa e tempo de 1 minuto, 1º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,05	0,05	123,53	111,82	11,7	230,3774285	2,1016
2	0,15	0,05	123,88	110,6	13,28	261,2649231	0,5316
3	0,25	0,05	126,69	109,93	16,76	329,7289241	2,9484
4	0,35	0,05	123,75	109,56	14,19	279,1678659	0,3784
5	0,45	0,05	115,48	107,12	8,36	164,4709908	5,4516
6	0,05	0,15	123,86	108,07	15,79	310,6455675	1,9784
7	0,15	0,15	129,61	107,07	22,54	443,442121	8,7284
8	0,25	0,15	130,75	106,45	24,3	478,0675928	10,4884
9	0,35	0,15	123,28	107,31	15,97	314,1868089	2,1584
10	0,45	0,15	115,21	106,68	8,53	167,8154966	5,2816
11	0,05	0,25	124,81	108,2	16,61	326,7778896	2,7984
12	0,15	0,25	130,12	105,47	24,65	484,95334	10,8384
13	0,25	0,25	134,27	109,02	25,25	496,7574781	11,4384
14	0,35	0,25	121,83	105,74	16,09	316,5476365	2,2784
15	0,45	0,25	116,47	106,63	9,84	193,5878647	3,9716
16	0,05	0,35	122,27	109,61	12,66	249,0673138	1,1516
17	0,15	0,35	122,37	106,39	15,98	314,3835446	2,1684
18	0,25	0,35	123,00	108,95	14,05	276,413567	0,2384
19	0,35	0,35	117,61	106,64	10,97	215,8189915	2,8416
20	0,45	0,35	117,11	108,28	8,83	173,7175656	4,9816
21	0,05	0,45	115,92	106,27	9,65	189,8498877	4,1616
22	0,15	0,45	117,85	108,22	9,63	189,4564164	4,1816
23	0,25	0,45	113,16	105,66	7,5	147,5517262	6,3116
24	0,35	0,45	114,53	108,22	6,31	124,1401856	7,5016
25	0,45	0,45	113,96	108,12	5,84	114,8936108	7,9716
25					13,8116	271,7233895	112,8816
						CUC (%)	67,31

Pressão	0,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	11580,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	12840	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	520	g
Massa (H2O Chuva)	1260,00	g
Volume (Chuva Real)	1,262	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	3,30	L
Intensidade Calculada	792,00	mm h⁻¹
Intensidade Média	267,78	mm h⁻¹
Intensidade Real	302,95	mm h⁻¹
Amostra	2	

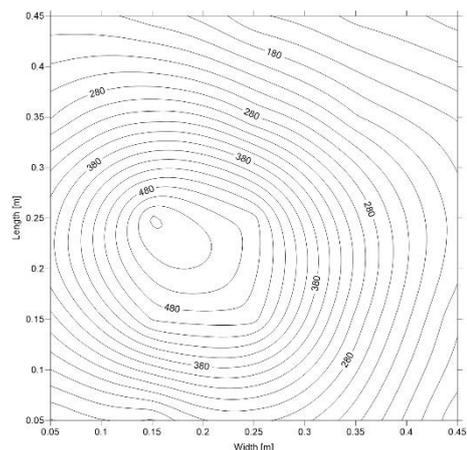


Figura 2 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 267,78 mm/h para pressão de 50 kPa e tempo de 1 minuto, 2ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,05	0,05	122,90	111,82	11,1	217,9830835	2,5312
2	0,15	0,05	122,67	110,6	12,07	237,4599113	1,5412
3	0,25	0,05	124,33	109,93	14,4	283,2993142	0,7888
4	0,35	0,05	121,00	109,56	11,44	225,0655663	2,1712
5	0,45	0,05	113,47	107,12	6,35	124,9271282	7,2612
6	0,05	0,15	124,93	108,07	16,86	331,6962804	3,2488
7	0,15	0,15	130,53	107,07	23,46	461,5417995	9,8488
8	0,25	0,15	130,15	106,45	23,7	466,2634547	10,0888
9	0,35	0,15	122,23	107,31	14,92	293,5295673	1,3088
10	0,45	0,15	114,98	106,68	8,3	163,290577	5,3112
11	0,05	0,25	126,97	108,2	18,77	369,2727867	5,1588
12	0,15	0,25	133,14	105,47	27,67	544,3675018	14,0588
13	0,25	0,25	133,73	109,02	24,71	486,1337538	11,0988
14	0,35	0,25	121,23	105,74	15,49	304,7434984	1,8788
15	0,45	0,25	116,31	106,63	9,68	190,4400946	3,9312
16	0,05	0,35	123,75	109,61	14,14	278,1841877	0,5288
17	0,15	0,35	123,17	106,39	16,78	330,1223954	3,1688
18	0,25	0,35	123,24	108,95	14,29	281,1352223	0,6788
19	0,35	0,35	116,93	106,64	10,29	202,4409683	3,3212
20	0,45	0,35	116,31	108,28	8,03	157,9787148	5,5812
21	0,05	0,45	116,82	106,27	10,55	207,5560948	3,0612
22	0,15	0,45	117,86	108,22	9,64	189,653152	3,9712
23	0,25	0,45	112,90	105,66	7,24	142,4365997	6,3712
24	0,35	0,45	113,99	108,22	5,77	113,5164613	7,8412
25	0,45	0,45	112,77	108,12	4,65	91,48207023	8,9612
25					13,6112	267,7808074	123,7112
						CUC (%)	63,64

Pressão	0,5	bar
Massa (Caixa Acrílica)	11580,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	12840	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	520	g
Massa (H2O Chuva)	1260,00	g
Volume (Chuva Real)	1,26	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	3,3	L
Intensidade Calculada	792,00	mm h⁻¹
Intensidade Média	279,13	mm h⁻¹
Intensidade Real	302,95	mm h⁻¹
Amostra	3	

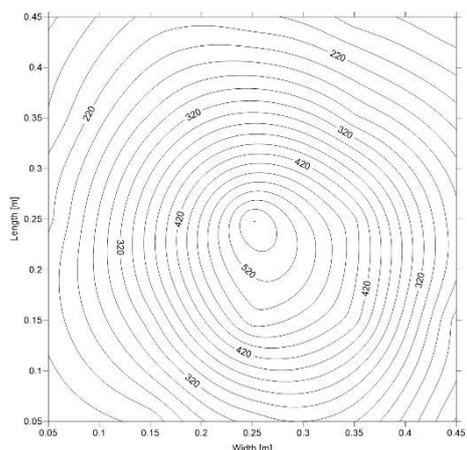


Figura 3 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 279,13 mm/h para pressão de 50 kPa e tempo de 1 minuto, 3ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,05	0,05	122,08	111,82	10,26	201,8507614	3,928
2	0,15	0,05	122,02	110,6	11,42	224,672095	2,768
3	0,25	0,05	125,47	109,93	15,54	305,7271766	1,352
4	0,35	0,05	124,87	109,56	15,31	301,202257	1,122
5	0,45	0,05	117,15	107,12	10,03	197,3258418	4,158
6	0,05	0,15	119,62	108,07	11,55	227,2296583	2,638
7	0,15	0,15	123,87	107,07	16,8	330,5158666	2,612
8	0,25	0,15	131,43	106,45	24,98	491,445616	10,792
9	0,35	0,15	129,10	107,31	21,79	428,6869484	7,602
10	0,45	0,15	118,42	106,68	11,74	230,9676354	2,448
11	0,05	0,25	119,09	108,2	10,89	214,2451064	3,298
12	0,15	0,25	124,16	105,47	18,69	367,6989016	4,502
13	0,25	0,25	137,61	109,02	28,59	562,4671802	14,402
14	0,35	0,25	128,32	105,74	22,58	444,2290636	8,392
15	0,45	0,25	120,09	106,63	13,46	264,8061646	0,728
16	0,05	0,35	118,83	109,61	9,22	181,3902554	4,968
17	0,15	0,35	120,85	106,39	14,46	284,4797281	0,272
18	0,25	0,35	126,74	108,95	17,79	349,9926945	3,602
19	0,35	0,35	121,12	106,64	14,48	284,8731993	0,292
20	0,45	0,35	119,00	108,28	10,72	210,9006006	3,468
21	0,05	0,45	114,18	106,27	7,91	155,6178872	6,278
22	0,15	0,45	118,73	108,22	10,51	206,7691523	3,678
23	0,25	0,45	115,96	105,66	10,3	202,6377039	3,888
24	0,35	0,45	116,84	108,22	8,62	169,5861173	5,568
25	0,45	0,45	115,18	108,12	7,06	138,8953582	7,128
25					14,188	279,1285188	109,884
						CUC (%)	69,02

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	11580,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	12820	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	520	g
Massa (H2O Chuva)	1240,00	g
Volume (Chuva Real)	1,2422	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	3,8	L
Intensidade Calculada	912,00	mm h⁻¹
Intensidade Média	261,04	mm h⁻¹
Intensidade Real	298,14	mm h⁻¹
Amostra	1	

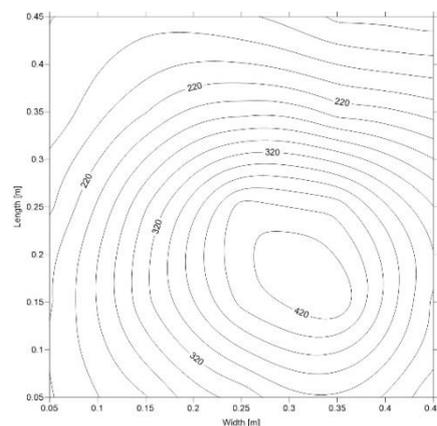


Figura 4 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 261,04 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 1 minuto, 1º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,05	0,05	122,28	111,2	11,1	217,9830835	2,1888
2	0,15	0,05	122,63	109,5	13,13	258,3138886	0,1388
3	0,25	0,05	125,03	109,5	15,53	305,530441	2,2612
4	0,35	0,05	126,20	109,1	17,1	336,4179357	3,8312
5	0,45	0,05	121,17	106,7	14,47	284,6764637	1,2012
6	0,05	0,15	118,65	107,6	11,05	217,3928766	2,2188
7	0,15	0,15	122,68	106,7	15,98	314,3835446	2,7112
8	0,25	0,15	126,69	106,1	20,59	405,0786722	7,3212
9	0,35	0,15	129,13	106,9	22,23	437,3433164	8,9612
10	0,45	0,15	122,27	106,2	16,07	316,1541653	2,8012
11	0,05	0,25	117,67	107,7	9,97	196,145428	3,2988
12	0,15	0,25	120,06	104,9	15,16	298,2512225	1,8912
13	0,25	0,25	129,49	108,7	20,79	409,0133849	7,5212
14	0,35	0,25	125,20	105,3	19,9	391,5039134	6,6312
15	0,45	0,25	121,49	106,2	15,29	300,8087858	2,0212
16	0,05	0,35	117,43	109,1	8,33	163,8807839	4,9388
17	0,15	0,35	117,32	106,2	11,12	218,770026	2,1488
18	0,25	0,35	121,45	108,6	12,85	252,8052908	0,4188
19	0,35	0,35	118,03	106,3	11,73	230,7708997	1,5388
20	0,45	0,35	118,67	107,9	10,77	211,8842788	2,4988
21	0,05	0,45	113,91	105,8	8,11	159,5525999	5,1588
22	0,15	0,45	116,66	107,9	8,76	172,3404162	4,5088
23	0,25	0,45	113,58	105,3	8,28	162,8971057	4,9888
24	0,35	0,45	114,78	107,9	6,88	135,3541168	6,3888
25	0,45	0,45	114,25	107,7	6,55	128,8618409	6,7188
25					13,2688	261,04458	94,3064
						CUC (%)	71,57

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	11580,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	12780	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	520	g
Massa (H2O Chuva)	1200,00	g
Volume (Chuva Real)	1,20	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	3,8	L
Intensidade Calculada	912,00	mm h⁻¹
Intensidade Média	265,46	mm h⁻¹
Intensidade Real	288,52	mm h⁻¹
Amostra	2	

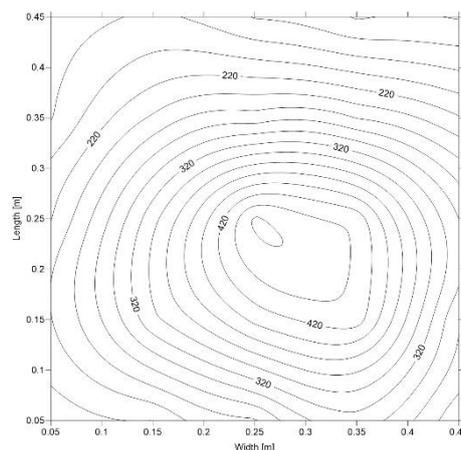


Figura 5 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 265,46 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 1 minuto, 2ª Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,05	0,05	121,73	111,2	10,5	207,162624	2,9632
2	0,15	0,05	120,67	109,5	11,17	219,753704	2,3232
3	0,25	0,05	122,56	109,5	13,06	256,936739	0,4332
4	0,35	0,05	124,98	109,1	15,88	312,416188	2,3868
5	0,45	0,05	119,08	106,7	12,38	243,558716	1,1132
6	0,05	0,15	119,75	107,6	12,15	239,033796	1,3432
7	0,15	0,15	123,72	106,7	17,02	334,844051	3,5268
8	0,25	0,15	126,71	106,1	20,61	405,472144	7,1168
9	0,35	0,15	128,75	106,9	21,85	429,867362	8,3568
10	0,45	0,15	120,45	106,2	14,25	280,34828	0,7568
11	0,05	0,25	118,83	107,7	11,13	218,966762	2,3632
12	0,15	0,25	121,84	104,9	16,94	333,270166	3,4468
13	0,25	0,25	132,27	108,7	23,57	463,705891	10,0768
14	0,35	0,25	127,27	105,3	21,97	432,22819	8,4768
15	0,45	0,25	121,44	106,2	15,24	299,825108	1,7468
16	0,05	0,35	118,18	109,1	9,08	178,635956	4,4132
17	0,15	0,35	118,56	106,2	12,36	243,165245	1,1332
18	0,25	0,35	122,29	108,6	13,69	269,331084	0,1968
19	0,35	0,35	119,46	106,3	13,16	258,904096	0,3332
20	0,45	0,35	119,17	107,9	11,27	221,721061	2,2232
21	0,05	0,45	114,37	105,8	8,57	168,602439	4,9232
22	0,15	0,45	117,27	107,9	9,37	184,34129	4,1232
23	0,25	0,45	113,36	105,3	8,06	158,568922	5,4332
24	0,35	0,45	114,89	107,9	6,99	137,518209	6,5032
25	0,45	0,45	114,73	107,7	7,03	138,305151	6,4632
25					13,4932	265,45933	92,176
						CUC (%)	72,67

Pressão	0,7	bar
Massa (Caixa Acrílica)	11580	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	12800	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	520	g
Massa (H2O Chuva)	1220,00	g
Volume (Chuva Real)	1,22	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	3,8	L
Intensidade Calculada	912,00	mm h⁻¹
Intensidade Média	264,4678	mm h⁻¹
Intensidade Real	293,328	mm h⁻¹
Amostra	3	

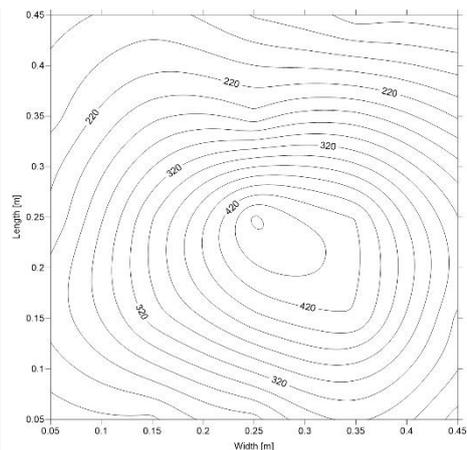


Figura 6 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 264,47 mm/h para pressão de 70 kPa e tempo de 1 minuto, 3º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,05	0,05	121,82	111,2	10,62	208,9332443	2,8228
2	0,15	0,05	120,46	109,5	10,96	215,6222558	2,4828
3	0,25	0,05	122,34	109,5	12,84	252,6085552	0,6028
4	0,35	0,05	124,49	109,1	15,39	302,7761421	1,9472
5	0,45	0,05	119,49	106,7	12,79	251,624877	0,6528
6	0,05	0,15	120,16	107,6	12,56	247,0999574	0,8828
7	0,15	0,15	123,37	106,7	16,67	327,9583034	3,2272
8	0,25	0,15	126,07	106,1	19,97	392,8810629	6,5272
9	0,35	0,15	128,06	106,9	21,16	416,2926034	7,7172
10	0,45	0,15	121,21	106,2	15,01	295,300188	1,5672
11	0,05	0,25	119,04	107,7	11,34	223,09821	2,1028
12	0,15	0,25	122,12	104,9	17,22	338,7787633	3,7772
13	0,25	0,25	132,29	108,7	23,59	464,0993627	10,1472
14	0,35	0,25	126,57	105,3	21,27	418,4566954	7,8272
15	0,45	0,25	121,47	106,2	15,27	300,4153145	1,8272
16	0,05	0,35	118,85	109,1	9,75	191,817244	3,6928
17	0,15	0,35	119,15	106,2	12,95	254,7726472	0,4928
18	0,25	0,35	121,16	108,6	12,56	247,0999574	0,8828
19	0,35	0,35	119,82	106,3	13,52	265,9865784	0,0772
20	0,45	0,35	118,95	107,9	11,05	217,3928766	2,3928
21	0,05	0,45	114,55	105,8	8,75	172,1436805	4,6928
22	0,15	0,45	117,52	107,9	9,62	189,2596808	3,8228
23	0,25	0,45	113,34	105,3	8,04	158,1754505	5,4028
24	0,35	0,45	114,52	107,9	6,62	130,2389903	6,8228
25	0,45	0,45	114,25	107,7	6,55	128,8618409	6,8928
25					13,4428	264,467779	89,284
						CUC (%)	73,43

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	11580,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	12780	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	520	g
Massa (H2O Chuva)	1200,00	g
Volume (Chuva Real)	1,20	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	5,4	L
Intensidade Calculada	1296,00	mm h⁻¹
Intensidade Média	256,20	mm h⁻¹
Intensidade Real	288,52	mm h⁻¹
Amostra	1	

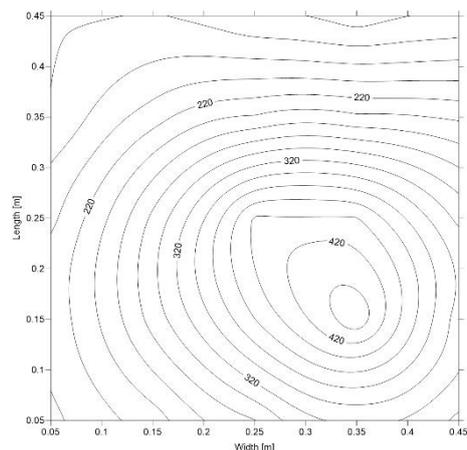


Figura 7 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 256,20 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 1 minuto, 1º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _i (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,05	0,05	121,12	111,2	9,9	195,1617498	3,10
2	0,15	0,05	121,16	109,5	11,66	229,3937503	1,36
3	0,25	0,05	123,67	109,5	14,17	278,7743946	1,15
4	0,35	0,05	125,50	109,1	16,4	322,6464412	3,38
5	0,45	0,05	121,70	106,7	15	295,1034523	1,98
6	0,05	0,15	118,10	107,6	10,5	206,5724166	2,52
7	0,15	0,15	121,34	106,7	14,64	288,0209695	1,62
8	0,25	0,15	125,40	106,1	19,3	379,6997753	6,28
9	0,35	0,15	130,00	106,9	23,1	454,4593166	10,08
10	0,45	0,15	123,00	106,2	16,8	330,5158666	3,78
11	0,05	0,25	117,61	107,7	9,91	194,9650142	3,11
12	0,15	0,25	119,36	104,9	14,46	284,4797281	1,44
13	0,25	0,25	129,17	108,7	20,47	402,7178446	7,45
14	0,35	0,25	125,70	105,3	20,4	401,3406952	7,38
15	0,45	0,25	122,19	106,2	15,99	314,5802802	2,97
16	0,05	0,35	117,27	109,1	8,17	160,7330137	4,85
17	0,15	0,35	116,90	106,2	10,7	210,5071293	2,32
18	0,25	0,35	120,90	108,6	12,3	241,9848309	0,72
19	0,35	0,35	118,70	106,3	12,4	243,9521873	0,62
20	0,45	0,35	119,92	107,9	12,02	236,4762331	1,00
21	0,05	0,45	113,80	105,8	8	157,3885079	5,02
22	0,15	0,45	116,11	107,9	8,21	161,5199562	4,81
23	0,25	0,45	112,55	105,3	7,25	142,6333353	5,77
24	0,35	0,45	114,47	107,9	6,57	129,2553121	6,45
25	0,45	0,45	114,93	107,7	7,23	142,239864	5,79
25					13,0228	256,204883	94,9584
						CUC (%)	70,83

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	11580,00	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	12780	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	520	g
Massa (H2O Chuva)	1200,00	g
Volume (Chuva Real)	1,20	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	5,4	L
Intensidade Calculada	1296,00	mm h⁻¹
Intensidade Média	260,07	mm h⁻¹
Intensidade Real	288,52	mm h⁻¹
Amostra	2	

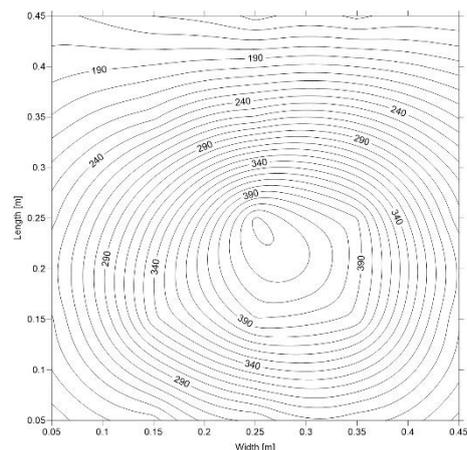


Figura 8 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 260,07 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 1 minuto, 2º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	m _c (g)	m _a (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,05	0,05	122,12	111,2	10,9	214,8353133	2,2992
2	0,15	0,05	121,45	109,5	11,95	235,0990837	1,2692
3	0,25	0,05	123,25	109,5	13,75	270,511498	0,5308
4	0,35	0,05	123,48	109,1	14,38	282,905843	1,1608
5	0,45	0,05	119,77	106,7	13,07	257,1334748	0,1492
6	0,05	0,15	119,73	107,6	12,13	238,6403251	1,0892
7	0,15	0,15	123,80	106,7	17,1	336,4179357	3,8808
8	0,25	0,15	126,38	106,1	20,28	398,9798676	7,0608
9	0,35	0,15	126,49	106,9	19,59	385,4051088	6,3708
10	0,45	0,15	120,44	106,2	14,24	280,1515441	1,0208
11	0,05	0,25	119,73	107,7	12,03	236,6729688	1,1892
12	0,15	0,25	121,24	104,9	16,34	321,4660274	3,1208
13	0,25	0,25	130,69	108,7	21,99	432,6216611	8,7708
14	0,35	0,25	125,15	105,3	19,85	390,5202353	6,6308
15	0,45	0,25	120,09	106,2	13,89	273,2657969	0,6708
16	0,05	0,35	119,30	109,1	10,2	200,6703476	3,0192
17	0,15	0,35	117,74	106,2	11,54	227,0329227	1,6792
18	0,25	0,35	121,87	108,6	13,27	261,0681875	0,0508
19	0,35	0,35	119,62	106,3	13,32	262,0518657	0,1008
20	0,45	0,35	119,02	107,9	11,12	218,770026	2,0992
21	0,05	0,45	114,61	105,8	8,81	173,3240943	4,4092
22	0,15	0,45	116,02	107,9	8,12	159,7493355	5,0992
23	0,25	0,45	112,73	105,3	7,43	146,1745767	5,7892
24	0,35	0,45	115,39	107,9	7,49	147,3549905	5,7292
25	0,45	0,45	115,37	107,7	7,67	150,896232	5,5492
25					13,2192	260,06877	78,7392
						CUC (%)	76,17

Pressão	1	bar
Massa (Caixa Acrílica)	11580	g
Massa (Recipiente + H2O Chuva)	12800	g
Recipiente Utilizado	1	
Massa (Recipiente)	520	g
Massa (H2O Chuva)	1220,00	g
Volume (Chuva Real)	1,22	L
Duração Chuva (min)	1	min
Volume (Chuva Total)	5,4	L
Intensidade Calculada	1296,00	mm h⁻¹
Intensidade Média	264,07	mm h⁻¹
Intensidade Real	293,33	mm h⁻¹
Amostra	3	

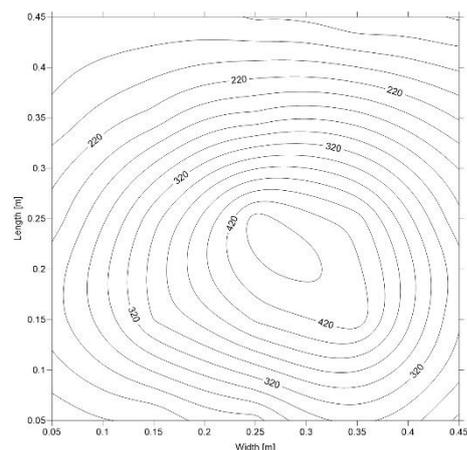


Figura 9 – Distribuição da chuva simulada de intensidade 264,07 mm/h para pressão de 100 kPa e tempo de 1 minuto, 3º Réplica.

Nº Copo	Localização (m)		m _t (g)	mc (g)	ma (g)	I (mm/h)	Xi-X
	x	y					
1	0,05	0,05	121,70	111,2	10,5	206,5724166	2,9228
2	0,15	0,05	120,72	109,5	11,22	220,7373824	2,2028
3	0,25	0,05	122,29	109,5	12,79	251,624877	0,6328
4	0,35	0,05	124,51	109,1	15,41	303,1696134	1,9872
5	0,45	0,05	119,69	106,7	12,99	255,5595897	0,4328
6	0,05	0,15	120,32	107,6	12,72	250,2477276	0,7028
7	0,15	0,15	124,01	106,7	17,31	340,549384	3,8872
8	0,25	0,15	126,56	106,1	20,46	402,521109	7,0372
9	0,35	0,15	128,83	106,9	21,93	431,4412473	8,5072
10	0,45	0,15	121,52	106,2	15,32	301,3989927	1,8972
11	0,05	0,25	119,33	107,7	11,63	228,8035434	1,7928
12	0,15	0,25	121,80	104,9	16,9	332,483223	3,4772
13	0,25	0,25	131,50	108,7	22,8	448,5572476	9,3772
14	0,35	0,25	126,01	105,3	20,71	407,4394999	7,2872
15	0,45	0,25	120,69	106,2	14,49	285,069935	1,0672
16	0,05	0,35	118,51	109,1	9,41	185,1282324	4,0128
17	0,15	0,35	117,80	106,2	11,6	228,2133365	1,8228
18	0,25	0,35	122,24	108,6	13,64	268,347406	0,2172
19	0,35	0,35	119,96	106,3	13,66	268,7408773	0,2372
20	0,45	0,35	118,98	107,9	11,08	217,9830835	2,3428
21	0,05	0,45	114,19	105,8	8,39	165,0611977	5,0328
22	0,15	0,45	116,26	107,9	8,36	164,4709908	5,0628
23	0,25	0,45	113,31	105,3	8,01	157,5852435	5,4128
24	0,35	0,45	115,14	107,9	7,24	142,4365997	6,1828
25	0,45	0,45	114,70	107,7	7	137,7149444	6,4228
25			111,73		13,4228	264,074308	89,9584
						CUC (%)	73,19

Anexo E1 – Determinação do D_{50} das gotas de chuvas simuladas (Brodie & Rosewell, 2007) para o bico aspersor ¼”-10SQ-HHSQ, altura de aplicação de 1,59 m e pressão de serviço de 70 kPa.

Classe	Diâmetro [mm]	Nº grânulos	Massa total [g]	Massa unitária [g]	Massa da gota [g]	Massa total de água [g]
> 4,75	4,750	2	0,192	0,080	0,076	0,151
4,75 - 3,35	4,050	4	1,207	0,057	0,054	0,215
3,35 - 2,36	2,855	61	1,874	0,020	0,019	1,164
2,36 - 1,7	2,030	200	1,549	0,007	0,007	1,414
1,7 - 1,18	1,440	447	0,856	0,003	0,003	1,272
1,18 - 0,85	1,015	723	0,384	0,001	0,001	0,769
< 0,85	0,850	900	0,24	0,000	0,001	0,729
Total		2337		0,167	0,160	5,715

Classe	Diâmetro médio da gota [mm]	Volume da gota [m³]	Volume total [m³]	% do volume total	Volume acumulado [%]	D50
> 4,75	5,263	7,586E-08	1,517E-07	2,646	2,646	
4,75 - 3,35	4,692	5,391E-08	2,156E-07	3,761	6,406	
3,35 - 2,36	3,304	1,915E-08	1,168E-06	20,374	26,780	
2,36 - 1,7	2,336	7,096E-09	1,419E-06	24,747	51,527	
1,7 - 1,18	1,658	2,857E-09	1,277E-06	22,268	73,795	
1,18 - 0,85	1,030	1,067E-09	7,714E-07	13,452	87,247	
< 0,85	0,844	8,126E-10	7,313E-07	12,753	100	
Total	2,732		5,734E-06	100		2,4

Anexo E2 – Determinação do D_{50} das gotas de chuvas simuladas (Brodie & Rosewell, 2007) para o bico aspersor ¼”-10SQ-HHSQ, altura de aplicação de 1,59 m e pressão de serviço de 100 kPa.

Classe	Diâmetro [mm]	Nº grânulos	Massa total [g]	Massa unitária [g]	Massa da gota [g]	Massa total de água [g]
> 4,75	4,750	2	0,118	0,075	0,071	0,142
4,75 - 3,35	4,050	2	0,684	0,028	0,027	0,054
3,35 - 2,36	2,855	18	1,427	0,011	0,010	0,188
2,36 - 1,7	2,030	119	1,633	0,004	0,004	0,529
1,7 - 1,18	1,440	426	0,923	0,002	0,002	0,853
1,18 - 0,85	1,015	725	0,538	0,001	0,001	0,703
< 0,85	0,850	1100	0,230	0,000	0,001	0,860
Total		2392		0,121	0,117	3,328

Classe	Diâmetro médio da gota [mm]	Volume da gota [m³]	Volume total [m³]	% do volume total	volume acumulado [%]	D50
> 4,75	5,151	7,115E-08	1,423E-07	4,261	4,261	
4,75 - 3,35	3,722	2,716E-08	5,432E-08	1,626	5,887	
3,35 - 2,36	2,683	1,049E-08	1,888E-07	5,652	11,539	
2,36 - 1,7	1,971	4,458E-09	5,305E-07	15,885	27,424	
1,7 - 1,18	1,429	2,009E-09	8,558E-07	25,625	53,049	
1,18 - 0,85	0,969	9,727E-10	7,052E-07	21,117	74,166	
< 0,85	0,818	7,843E-10	8,628E-07	25,834	100	
Total	2,392		3,340E-06	100		1,5

Anexo E3 – Determinação do D_{50} das gotas de chuvas simuladas (Brodie & Rosewell, 2007) para o bico aspersor ¼”-10SQ-HHSQ, altura de aplicação de 1,59 m e pressão de serviço de 150 kPa.

Classe	Diâmetro [mm]	Nº grânulos	Massa total [g]	Massa unitária [g]	Massa da gota [g]	Massa total de água [g]
> 4,75	4,750	3	0,000	0,070	0,066	0,199
4,75 - 3,35	4,050	3	0,347	0,024	0,023	0,070
3,35 - 2,36	2,855	12	0,786	0,010	0,010	0,115
2,36 - 1,7	2,030	130	1,367	0,004	0,004	0,565
1,7 - 1,18	1,440	975	1,045	0,001	0,002	1,677
1,18 - 0,85	1,015	935	0,650	0,000	0,001	0,862
< 0,85	0,850	1200	0,600	0,000	0,001	0,882
Total		3258		0,110	0,107	4,371

Classe	Diâmetro médio da gota [mm]	Volume da gota [m³]	Volume total [m³]	% do volume total	Volume acumulado [%]	D50
> 4,75	5,034	6,644E-08	1,993E-07	4,544	4,544	
4,75 - 3,35	3,542	2,349E-08	7,046E-08	1,606	6,151	
3,35 - 2,36	2,605	9,639E-09	1,157E-07	2,637	8,788	
2,36 - 1,7	1,955	4,364E-09	5,673E-07	12,934	21,722	
1,7 - 1,18	1,333	1,726E-09	1,683E-06	38,375	60,097	
1,18 - 0,85	0,936	9,256E-10	8,655E-07	19,732	79,830	
< 0,85	0,769	7,372E-10	8,847E-07	20,170	100	
Total	2,311		4,386E-06	100		1,49

Anexo E4 – Determinação da energia cinética das gotas de chuvas simuladas (van Djick *et al.*, 2002) para o bico aspersor ¼”-10SQ-HHSQ, altura de aplicação de 1,59 m e pressão de serviço de 70 kPa.

Diâmetro médio [mm]	Massa de uma gota [g]	Número de gotas	Velocidade da gota [m/s]	Energia cinética por gota [J]	Energia cinética por cada Diâmetro de gota [J]	% E_c	% E_c acumulado
5,26	0,076	2	11,362	0,004880	0,0097591	4,42	4,42
4,69	0,054	4	11,221	0,003382	0,0135277	6,13	10,55
3,30	0,019	61	10,630	0,001078	0,0657790	29,79	40,34
2,34	0,007	200	9,753	0,000336	0,0672591	30,46	70,80
1,66	0,003	447	8,456	0,000102	0,0454943	20,61	91,41
1,03	0,001	723	5,676	0,000017	0,0123827	5,61	97,02
0,84	0,001	900	4,250	0,000007	0,0065819	2,98	100

Área do coletor [m²]	0,15	
Duração [s]	1,00	
I [mm/h]	137,63	
EC [J/m².mm]	38,50	154,00
KEI [J/m².s]	1,47	
Kep [J/m².mm]	38,50	
ΣE_c [J]	0,22	

Anexo F1 – Peso específico dos grãos passantes na peneira de 2,0 mm.

PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS			
Projeto		RESP	
Registro nº	Passante na # 2,0 mm	Data:	15/04/2019
Ensaio nº		Ensaiado por:	Thiago Augusto
Calculado/visto por:		Teor de umidade (%)	3,71
Solo úmido (g)	50	Solo seco (g)	48,210
Picnômetro nº	SN	2	3
Peso do picnômetro (g)	204,120	166,700	182,090
Peso do Pic. + Solo (g)	252,330	214,910	230,300
Peso solo seco (g)	48,210	48,210	48,210
Peso do Pic.+ Solo + Água (g)	693,070	665,720	699,570
Peso d'água Complementar (g)	440,740	450,810	469,270
Peso Pic + Água (g)	662,760	635,390	669,270
Peso de água (no Pic) (g)	458,640	468,690	487,180
Peso d'água deslocado (g)	17,900	17,880	17,910
Temperatura	25,0	25,0	25,0
Peso esp. água (Temp) (g/cm ³)	0,9970	0,9970	0,9970
Volume de água deslocado (cm ³)	17,953	17,933	17,963
Peso esp. dos Grãos	2,685	2,688	2,684
Média	2,685		

Teor de Umidade		
1	2	100
73,37	89,09	64,38
71,25	86,36	62,49
2,12	2,73	1,89
13,83	13,26	11,6
57,42	73,10	50,89
3,69	3,73	3,71
3,71		

Anexo F2 – Peso específico dos grãos passantes na peneira de 4,8 mm.

PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS			
Projeto		RESP	
Registro nº	Passante na # 4,8	Data:	15/04/2019
Ensaio nº		Ensaiado por:	Thiago Augusto
Calculado/visto por:		Teor de umidade (%)	3,65
Solo úmido (g)	50	Solo seco (g)	48,242
Picnômetro nº	2	2	3
Peso do picnômetro (g)	204,120	166,700	182,090
Peso do Pic. + Solo (g)	252,362	214,942	230,332
Peso solo seco (g)	48,242	48,242	48,242
Peso do Pic.+ Solo + Água (g)	732,600	708,540	746,990
Peso d'água Complementar (g)	480,238	493,598	516,658
Peso Pic + Água (g)	702,070	678,070	716,360
Peso de água (no Pic) (g)	497,950	511,370	534,270
Peso d'água deslocado (g)	17,712	17,772	17,612
Temperatura	25,0	25,0	25,0
Peso esp. água (Temp) (g/cm ³)	0,9970	0,9970	0,9970
Volume de água deslocado (cm ³)	17,764	17,824	17,664
Peso esp. dos Grãos	2,716	2,707	2,731
Média	2,723		

Teor de Umidade		
24	29	80
61,89	60,85	78,7
60,26	59,17	76,44
1,63	1,68	2,26
15,09	13,21	14,88
45,17	45,96	61,56
3,61	3,66	3,67
3,65		

Anexo G1 – Controle do teor de umidade do solo utilizado na preparação da amostra **sem vegetação para o primeiro ensaio de chuva**, considerando $P_p = 220,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$ e $w_i = 18,03\%$.

Camada	Sacos Plásticos	w (%)	Massa (kg)	Camada	Sacos Plásticos	w (%)	Massa (kg)	Camada	Sacos Plásticos	w (%)	Massa (kg)
Topo	1-E	17,9	11,22	Meio	2-C	17,6	11,26	Fundo	1-C	18,4	11,22
	2-E	17,3	11,16		3-C	18,2	11,4		8-C	19	11,34
	3-B	18,7	11,24		6-A	17,5	12,98		09-C	17,9	11,04
	3-E	17,6	6,3		3-E	17,6	4,28		4-C	18,5	6,32
	Média	17,9	39,92		Média	17,7	39,92		Média	18,5	39,92
	*σ	0,60			*σ	0,32			*σ	0,45	
**CV	3,37		**CV	1,81		**CV	2,44				

Anexo G2 – Controle do teor de umidade do solo utilizado na preparação da amostra **sem vegetação para o terceiro ensaio de chuva**, considerando $P_p = 86,0 \text{ mm h}^{-1}$, $\alpha_D = 15^\circ$ e $w_i = 18,0\%$.

Camada	Sacos Plásticos	w (%)	Massa (kg)	Camada	Sacos Plástico s	w (%)	Massa (kg)	Camada	Sacos Plástico s	w (%)	Massa (kg)
Topo	8F	17,5	11,32	Meio	1F	17,6	11,36	Fundo	13F	18,9	11,36
	7F	17,2	11,22		6F	16,2	11,3		10F	19,4	11,36
	2F	17,7	11,28		4F	17,2	11,34		12F	19,0	11,08
	3F	17,9	5,86		5F	18,2	5,68		11F	19,0	5,88
	Média	17,6	39,68		Média	17,3	39,68		Média	19,1	39,68
	*σ	0,30			*σ	0,84			*σ	0,22	
**CV	1,70		**CV	4,86		**CV	1,16				

Anexo G3 – Teores de umidade iniciais obtidos na estufa para solo com vegetação antes da realização do ensaio no simulador de chuva

Saco	1G		Data		03/07/2019	
Sensor	1	2	3	4	5	
Cápsula	138	137	112	146	11	
Tara	5,71	5,98	6,24	5,89	4,07	
M. Úmida + Tara	6,91	7,80	6,80	7,66	5,08	
M. Seca + Tara	6,75	7,55	6,73	7,44	4,97	
M. Água	0,16	0,25	0,07	0,22	0,11	
M. Solo	1,04	1,57	0,49	1,55	0,90	
w	15,4%	15,9%	14,3%	14,2%	12,2%	
<i>w médio</i>						14,4%

Anexo H1 – Comparativo entre os valores de teor de umidade obtidos a partir dos ensaios na estufa e pelos sensores de umidade instalados no SC e conseqüentemente, grau de saturação e sucções (1° Ensaio sem vegetação).

Sensor	Camada	w (%)	$S_{r, w}$ (%)	θ_{wi}	$w_{\theta w, sensor}$ (%)	$S_{r, \theta w, sensor}$ (%)	$\theta_{w, sensor}$	ψ_{curva} (kPa)	ψ_{sensor} (kPa)
1		17,88	47,6	0,239	18,5	34,6	0,174	15,0	-
2	Topo	17,88	47,6	0,239	15,8	32,6	0,164	15,0	-
3		17,88	47,6	0,239	20,4	40,4	0,203	15,0	-
4	Meio	17,73	47,2	0,237	15,8	50,3	0,253	14,8	20,9
5	Fundo	18,45	49,1	0,247	17,1	38,8	0,195	12,0	-

w : umidade da estufa para cada camada; $S_{r, w}$: grau de saturação a partir do valor de w ; θ_{wi} : conteúdo volumétrico do solo a partir de w ; $w_{\theta w, sensor}$: umidade obtida pelos sensores; $S_{r, \theta w, sensor}$: grau de saturação a partir do valor de $w_{\theta w, sensor}$; $\theta_{w, sensor}$: conteúdo volumétrico obtido pelos sensores; ψ_{curva} : sucção obtida pela curva característica solo-água; ψ_{sensor} : sucção obtida pelo tensiômetro.

Sensor	Erro (w)	Erro (S_r)	Erro (θ)
1	3,3	27,3	27,3
2	11,6	31,4	31,4
3	13,9	15,1	15,1
4	11,1	6,7	6,7
5	7,3	21,0	21,0

Anexo H2 – Comparativo entre os valores de teor de umidade obtidos a partir dos ensaios na estufa e pelos sensores de umidade instalados no SC e conseqüentemente, grau de saturação e sucções (3° Ensaio sem vegetação).

Sensor	Camada	w (%)	$S_{r, w}$ (%)	θ_{wi}	$w_{\theta w, sensor}$ (%)	$S_{r, \theta w, sensor}$ (%)	$\theta_{w, sensor}$	ψ_{curva} (kPa)	ψ_{sensor} (kPa)
1		17,58	46,8	0,235	21,4	39,0	0,196	17,0	27,7
2	Topo	17,58	46,8	0,235	22,1	42,8	0,215	17,0	28,4
3		17,58	46,8	0,235	20,0	39,0	0,196	17,0	27,0
4	Meio	17,30	46,1	0,232	9,0	35,0	0,176	17,5	27,5
5	Fundo	19,08	50,8	0,255	20,4	44,8	0,225	11,0	15,5

w : umidade da estufa para cada camada; $S_{r, w}$: grau de saturação a partir do valor de w ; θ_{wi} : conteúdo volumétrico do solo a partir de w ; $w_{\theta w, sensor}$: umidade obtida pelos sensores; $S_{r, \theta w, sensor}$: grau de saturação a partir do valor de $w_{\theta w, sensor}$; $\theta_{w, sensor}$: conteúdo volumétrico obtido pelos sensores; ψ_{curva} : sucção obtida pela curva característica solo-água; ψ_{sensor} : sucção obtida pelo tensiômetro.

Sensor	Erro (w)	Erro (S_r)	Erro (θ)
1	21,8	16,7	16,7
2	25,7	8,6	8,6
3	13,8	16,7	16,7
4	48,0	24,0	24,0
5	6,9	11,9	11,9

Anexo I1 – Parâmetros de ajuste da curva característica de varredura solo-água (CCSA) ajustados para a modelagem numérica 3º Ensaio **sem vegetação** (Pontos 3 e 5) considerando Gitirana Jr.& Fredlund (2004).

	ψ_{b1}	ψ_{res1}	S_{res1}	ψ_{b2}	S_b	ψ_{res2}	S_{res2}	a_1	a_2	a_3	a_4
Ponto 3	0,30	6,30	0,480	5000,0	0,400	22000,0	0,040	0,080	0,042	0,080	0,080
Ponto 5	0,30	4,53	0,490	5000,0	0,400	22000,0	0,040	0,080	0,095	0,080	0,080

Anexo I2 – Parâmetros de ajuste da curva característica de varredura solo-água (CCSA) ajustados para a modelagem numérica 1º Ensaio **com vegetação** (Pontos 3 e 5) considerando Gitirana Jr.& Fredlund (2004).

	ψ_{b1}	ψ_{res1}	S_{res1}	ψ_{b2}	S_b	ψ_{res2}	S_{res2}	a_1	a_2	a_3	a_4
Ponto 3	0,30	8,10	0,435	5000,0	0,287	22000,0	0,040	0,080	0,076	0,080	0,080
Ponto 5	0,30	10,00	0,390	5000,0	0,130	22000,0	0,040	0,080	0,071	0,080	0,080

Anexo I3 – Parâmetros da curva característica de varredura solo-água (CCSA) ajustados para a modelagem numérica (**sem vegetação**) para Ponto 4 considerando Gitirana Jr.& Fredlund (2004).

	ψ_{b1}	ψ_{res1}	S_{res1}	ψ_{b2}	S_b	ψ_{res2}	S_{res2}	a_1	a_2	a_3	a_4
1º Ensaio (solo)	0,30	6,00	0,480	5000,0	0,400	22000,0	0,040	0,080	0,060	0,080	0,080
2º Ensaio (solo)	0,19	0,50	0,910	40,0	1,000	22000,0	0,040	0,050	0,060	0,080	0,080
3º Ensaio (solo)	0,30	6,00	0,480	5000,0	0,400	22000,0	0,040	0,080	0,060	0,080	0,080
4º Ensaio (solo)	0,27	1,20	0,710	500,0	0,900	22000,0	0,040	0,078	0,060	0,080	0,080

Anexo I4 – Parâmetros da curva característica de varredura solo-água (CCSA) ajustados para a modelagem numérica (**com vegetação**) para Ponto 4 considerando Gitirana Jr.& Fredlund (2004).

	ψ_{b1}	ψ_{res1}	S_{res1}	ψ_{b2}	S_b	ψ_{res2}	S_{res2}	a_1	a_2	a_3	a_4
1º Ensaio (VEG)	0,30	10,00	0,390	5000,0	0,287	22000,0	0,040	0,080	0,071	0,080	0,080
2º Ensaio (VEG)	0,30	10,00	0,390	5000,0	0,287	22000,0	0,040	0,080	0,095	0,080	0,080
3º Ensaio (VEG)	0,30	3,00	0,550	5000,0	0,950	22000,0	0,040	0,080	0,110	0,080	0,080