



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Eduardo Eiler Batista de Araújo

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE
CHUVA EM TELHADOS VERDES COM APLICAÇÃO DE
GEOSSINTÉTICOS**

**Natal/RN
2018**

Eduardo Eiler Batista de Araújo

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE
CHUVA EM TELHADOS VERDES COM APLICAÇÃO DE
GEOSSINTÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.^a Dr. Fagner Alexandre Nunes de França
Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Ada Cristina Scudelari

Natal/RN
2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Araújo, Eduardo Eiler Batista de.

Avaliação da capacidade de retenção de água de chuva em telhados verdes com aplicação de geossintéticos / Eduardo Eiler Batista de Araújo. - 2019.

97f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2019.

Orientador: Dr. Fagner Alexandre Nunes de França.

Coorientadora: Dra. Ada Cristina Scudelari.

1. Telhados Vegetados - Dissertação. 2. Coberturas vegetadas - Dissertação. 3. escoamento - Dissertação. 4. Drenagem urbana - Dissertação. I. França, Fagner Alexandre Nunes de. II. Scudelari, Ada Cristina. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

EDUARDO EILER BATISTA DE ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE
CHUVA EM TELHADOS VERDES COM APLICAÇÃO DE
GEOSSINTÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunces de França – Orientador

Prof^a. Dr^a. Ada Cristina Scudelari – Co-orientadora

Prof. Dr. Joana Darc Freire de Medeiros (UFRN) – Examinador Interno

Prof. Dr. Alexandre da Costa Pereira (IFRN) – Examinador Externo

Natal, 31 de julho de 2018.

AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA EM TELHADOS VERDES COM APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS

Eduardo Eiler Batista de Araújo

Orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Ada Cristina Scudelari

RESUMO

O crescimento populacional dos centros urbanos contribui fortemente para a impermeabilização do solo e gera diversas consequências ambientais, como aumento da ocorrência de enchentes, ilhas de calor e poluição. Essa elevação da área impermeável, quando analisada em uma escala maior, tem o condão de tornar grandes centros urbanos mais suscetíveis à ocorrência de inundações quando ocorrem chuvas de forte intensidade. Neste cenário, a utilização de telhados verdes (em inglês, *green roofs*) ganha espaço como opção para redução de ocorrência de inundações. Além de trazer benefícios quanto ao manejo de águas de chuva, os telhados verdes também oferecem benefícios térmicos, acústicos, estéticos e ainda auxiliam na redução da poluição do ar. Sabendo-se que o seu comportamento varia bastante em função da sua configuração e das condições climáticas locais, este estudo tem como principal objetivo analisar a capacidade de retenção de água de chuva de um protótipo de telhado verde extensivo, construído com a utilização de geossintéticos, por meio de simulações de chuva, para as condições climáticas de Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. Nesta pesquisa, procurou-se compreender o desempenho do telhado verde em função do período de estiagem, com a respectiva aferição do teor de umidade do substrato precedente a simulação da chuva e em função da duração e intensidade da chuva simulada. Os resultados mostraram que a capacidade de retenção do telhado verde variou entre 2,02% e 100%, onde o período de estiagem exerceu forte influência sobre a capacidade de retenção.

Palavras-chave: Telhados vegetados, coberturas vegetadas, escoamento, drenagem urbana.

EVALUATION OF WATER RETENTION CAPACITY OF GREEN ROOFS WITH APPLICATION OF GEOSYNTHETICS

Eduardo Eiler Batista de Araújo

Adviser: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França

Co-adviser: Prof.^a Dr.^a Ada Cristina Scudelari

ABSTRACT

Population growth of urban areas produce diverse environmental impacts, such as increase in the probability of flooding, heat island effect e pollution. The urbanization demands buildings, which leads to soil waterproofing. This increase in impervious surface area might turn great urban space into areas more susceptible to flooding when occurrence of intense rain. Therefore, the green roofs emerge in the worldwide scenario as an alternative to mitigate flooding. In addition to storm-water management, green roofs also offer other benefits (e.g. thermal benefits, noise reduction, aesthetic appeal, air pollution). Although usage of green roofs is considered an ancient technique, the green roofs studies increased by the 2000s. The performance of green roofs depends on constructive and environmental aspects. Therefore, the main objective of this study is to evaluate the water retention capacity of a green roof prototype with geosynthetics by means of simulated rain for climatic conditions of Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. In this study, it is also expected to assess the performance of the green roofs in function of drought period, with admeasurement of moisture content antecedent rain simulation and in function of duration and intensity of the simulated rain. The results showed that the retention capacity of the green roof varied from 2,02% to 100% in situations that the antecedent rainfall condition affected the retention capacity directly.

Keywords: Ecoroofs, Vegetated Roofs, Runoff, Stormwater attenuation.

SUMÁRIO

Capítulo 1: Introdução	1
Capítulo 2: Revisão da Literatura	4
2.1 Classificação dos telhados verdes quanto à espessura do substrato	4
2.2 Componentes dos telhados verdes	5
2.2.1 Vegetação	6
2.2.2 Substrato	7
2.2.3 Camadas funcionais	10
2.2.4 Aplicação de geossintéticos nas camadas funcionais	11
2.3 Benefícios dos telhados verdes	12
2.3.1 Manejo de águas pluviais	12
2.3.2 Isolamento térmico	21
2.3.3 Qualidade da água da chuva escoada	21
2.3.4 Isolamento acústico	22
2.3.5 Poluição do ar	23
2.4 Dificuldades na implementação dos telhados verdes	23
Capítulo 3: Metodologia	25
3.1 Localização da pesquisa	25
3.2 Módulo	26
3.3 Simulador de chuvas	30
3.4 Intensidade das chuvas	33
3.5 Calibração do simulador	35
3.6 Consideração do período de estiagem	37
3.7 Codificação das chuvas	39
3.8 Análise de dados	41

Capítulo 4: Análise de Resultados	42
4.1 Capacidade de retenção	42
4.2 Vazão de pico do escoamento e volume de escoamento acumulado	46
4.2.1 Ensaio no telhado controle	46
4.2.2 Ensaio com o objetivo de saturar o substrato	49
4.2.3 Ensaio com o substrato na condição saturada	51
4.3 Tempo de início e de fim de escoamento	54
4.4 Volume de chuva necessário para ocorrência de escoamento	56
4.5 Variação do teor de umidade do substrato	57
Capítulo 5: Conclusões	60
Capítulo 6: Recomendações para futuras pesquisas	62
Referências	65
Apêndice A	70
Apêndice B	76
Apêndice C	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Imagem esquemática e características de telhados verdes extensivos, semi-intensivos e intensivos. (Adaptado de Green Roof Outfitters, 2017)	4
Figura 2.2 - Componentes de um telhado verde. Adaptado de Vijayaraghavan (2016).....	5
Figura 2.3 – Principais benefícios oferecidos pelos telhados verdes.	5
Figura 2.4 - Capacidade de retenção em telhados verdes com diferentes espessuras de substrato (P) e um telhado controle (C). Adaptado de Morgan et al. (2013).	9
Figura 2.5 - Diferença de curvas de volume de vazão do escoamento x tempo entre telhado convencional (linha contínua) e telhado verde (linha tracejada). Adaptado de Berndtsson (2010).....	13
Figura 2.6 - Capacidade de retenção de telhados verdes extensivos em pesquisas de diferentes países. Adaptado de Gregoire e Clausen (2011).	15
Figura 2.7 – Aumento da capacidade de retenção de água de um telhado verde com o aumento de períodos de estiagem até o terceiro dia. Adaptado de Lee et al. (2013).	16
Figura 2.8 - Percentual de retenção de telhados verdes com diferentes inclinações e com chuvas de diferentes intensidades. Dados obtidos de Getter et al. (2007).....	17
Figura 2.9 - Percentual de retenção de dois telhados verdes com diferentes vegetações. Fonte: Lima (2013).....	18
Figura 2.10 - Percentual de retenção de telhados verdes extensivos com geotêxtil (em lilás, MVGT) com chuvas de 20min (à esquerda) e 30min (à direita) (Louzada, 2016)	20
Figura 2.11 - a) À esquerda, percentual de retenção do telhado verde em função do período de estiagem e b) À direita, volume de escoamento em função do tempo para diferentes períodos de estiagem. (Miranda, 2016).	21
Figura 3.1 - Localização da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em Natal/RN. Fonte: Google Maps (10/05/2017).	25

Figura 3.2 - a) Local onde as simulações de chuva foram realizadas com terreno limpo e b) Imagem esquemática do isolamento do local, com a colocação dos caibros, ganchos parafusados e lonas.	26
Figura 3.3 - Imagem esquemática com dimensões do módulo de madeira.	27
Figura 3.4 - Geomembrana e válvula de drenagem instalada (Louzada, 2016).....	27
Figura 3.5 - Detalhe da faixa de brita entre o geotêxtil e a geomembrana.	28
Figura 3.6 - Disposição das camadas de areia barrada e do adubo	28
Figura 3.7 - Curva de distribuição granulométrica da areia (Louzada, 2016).....	29
Figura 3.8 - Simulador amarrado às ripas de madeira pinus. Detalhe do microaspersor à direita	30
Figura 3.9 - Imagem esquemática com os materiais utilizados para simular a chuva.....	31
Figura 3.10 - Localizações de onde as amostras do substrato eram coletadas para análise do teor de umidade e posicionamento dos pluviômetros. Detalhe do pluviômetro à direita	31
Figura 3.11 - Precipitações de chuvas intensas para a cidade de Natal. SEMOV (2007), apud Prefeitura Municipal de Natal (2008).....	34
Figura 3.12 - Calibração do simulador – comparação entre o volume medido nos pluviômetros e o volume escoado	36
Figura 3.13 - Gráfico da análise do decaimento do teor de umidade do substrato nos três pontos de coleta de amostras e a sua média ao longo de 10 dias sem chuva	38
Figura 3.14 - Curva de decaimento do teor de umidade médio do substrato em um período de estiagem de 10 dias	38
Figura 4.1 – Capacidade de retenção dos ensaios utilizando o segundo simulador.....	43
Figura 4.2 - Capacidade de retenção dos ensaios com períodos de estiagem equivalente de 0 dias.	43

Figura 4.3 - Vazão ao longo do tempo para simulações no módulo controle com duração de 10 min.....	46
Figura 4.4 - Volume de escoamento acumulado ao longo do tempo para simulações no módulo controle com duração de 10 min.....	47
Figura 4.5 - Vazão ao longo do tempo para simulações no módulo controle com durações de 24 e 30 minutos.	47
Figura 4.6 - Volume de escoamento acumulado ao longo do tempo para simulações no módulo controle com durações de 24 e 30 minutos.	48
Figura 4.7 - Vazão ao longo do tempo para simulações no módulo controle com duração de 60 min.....	48
Figura 4.8 - Volume de escoamento acumulado ao longo do tempo para simulações no módulo controle com durações de 60 min	49
Figura 4.9 - Vazão ao longo do tempo para chuvas de 10, 15 e 40 minutos, simuladas com o objetivo de saturar o substrato	50
Figura 4.10 - Volume de escoamento acumulado ao longo do tempo para chuvas de 10, 15 e 40 minutos, simuladas com o objetivo de saturar o substrato	50
Figura 4.11 - Vazão ao longo do tempo para chuvas de 30 minutos, simulada após o substrato encontrar-se saturado.....	51
Figura 4.12 - Volume de escoamento acumulado ao longo do tempo para chuvas de 30 minutos, simulada após o substrato encontrar-se saturado	51
Figura 4.13 - Vazão ao longo do tempo para chuva de 12 minutos, simulada após o substrato encontrar-se saturado	52
Figura 4.14 - Volume de escoamento acumulado longo do tempo para chuva de 12 minutos, simulada após o substrato encontrar-se saturado	52
Figura 4.15 - Vazão ao longo do tempo para chuvas de 30 minutos, simulada após o substrato encontrar-se saturado	53
Figura 4.16 - Volume de escoamento acumulado ao longo do tempo para chuvas de 30 minutos, simulada após o substrato encontrar-se saturado	54
Figura 4.17 - Volume de chuva equivalente no tempo de início de escoamento.....	56

Figura 4.18 - Valores de umidade inicial (antes da chuva) e final (após a chuva) do substrato.....	58
Figura 4.19 - Variação da umidade do substrato em função do volume de chuva precipitado.....	59
Figura 6.1 - a) Local utilizado para realização da simulação de chuvas com terreno limpo b) Mesmo local, com vegetação subindo e cobrindo a estrutura de isolamento utilizada.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Percentual de cobertura de telhados verdes com diferentes espessuras de substrato entre Setembro/2005 e Junho/2008. Adaptado de Morgan et al. (2013).....	10
Tabela 2.2 - Percentual de retenção de telhados verdes com diferentes inclinações e com chuvas de diferentes intensidades. Adaptado de Villarreal e Bengtsson (2005).....	16
Tabela 2.3 - Percentual de retenção de telhados verdes com diferentes inclinações e com chuvas de diferentes intensidades. Adaptado de Getter et al. (2007).	17
Tabela 2.4 - Valores de variação de umidade e capacidade de retenção em função da inclinação e da umidade inicial em telhados verdes. Adaptado de Moruzzi (2014).	19
Tabela 2.5 - Dificuldades encontradas na implementação de telhados verdes na Austrália, em Hong Kong e no Brasil.....	24
Tabela 3.1 - Relação dos materiais utilizados no simulador de chuvas	32
Tabela 3.2 - Tempo de retorno de projeto de chuvas para diferentes ocupações da área. Adaptado de Prefeitura do Município de São Paulo (1999).	34
Tabela 3.3 - Resultados das simulações para segunda calibração.....	35
Tabela 3.4 - Período de estiagem equivalente em função do teor de umidade	39
Tabela 3.5 - Codificação das chuvas utilizando o primeiro simulador	40
Tabela 3.6 - Codificação das chuvas utilizando o segundo simulador	40
Tabela 4.1 - Dados dos ensaios de simulação de chuva que apresentaram escoamento.....	44
Tabela 4.2 - Tempo de início e de fim de escoamento das simulações de chuva.....	55

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	14
Equação 3.1	33
Equação 3.2	37
Equação 3.3	37
Equação 3.4	39

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

°C – Graus Celsius

CBCS – Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

cm – Centímetro

CO₂ – Dióxido de carbono

CR – Capacidade de Retenção

CV – Cavalo vapor (potência)

dB - Decibel

EPDM - Etileno Propileno Dieno Monômero

EUA – Estados Unidos da América

g/cm³ - Grama por centímetro cúbico

g/m² - Grama por metro quadrado

h – Hora

IGS - International Geosynthetics Society

k – Coeficiente de permeabilidade

kg – Quilograma

km² - Quilômetro quadrado

L - Litro

m – Metro

m² - Metro quadrado

min - Minuto

mm - Milímetro

mm/h – Milímetro por hora

mm/min - Milímetro por minuto

MC – Módulo Controle

MVGA – Módulo Vegetado Geomanta

MVGT – Módulo Vegetado Geotêxtil

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

P – Precipitação anual

PEAD - Polietileno de alta densidade

PL – Projeto de Lei

PVC - Policloreto de vinila

RO – Runoff anual

S – Espessura do substrato

Qtd – Quantidade

SEMOV – Secretaria Municipal de Obras Públicas e Infraestrutura

T – Tempo de retorno

Und – Unidade

UV – Ultravioleta

CAPÍTULO 1

Introdução

Com o crescimento populacional e econômico das cidades, percebe-se a necessidade de maior número de edificações, sejam para fins habitacionais, comerciais ou de serviços. Independente da finalidade, a construção de edifícios muitas vezes acarreta a supressão de áreas verdes, levando a um aumento da área da superfície impermeável do terreno. Como consequência, os centros urbanos ficam cada vez mais suscetíveis à ocorrência de inundações, pois, para esses casos, a água da chuva proporciona maior volume de escoamento em uma área com menor taxa de infiltração e menor evapotranspiração. Outros impactos ambientais causados pela urbanização dos centros urbanos são o aumento da temperatura, formação de ilhas de calor, diminuição da umidade relativa do ar e poluição (Vijayaraghavan, 2016). Uma forma de mitigar esses impactos é a construção de telhados verdes (Rugh e Fernandez, 2005). Eles proporcionam benefícios térmicos, econômicos e estéticos às edificações (Blank et al., 2013, Hashemi et al., 2015, Carpenter et al., 2016). Além desses benefícios, o uso de telhados verdes reduz o volume total e volume de pico de escoamento das águas de chuvas, bem como aumenta o tempo necessário para que a água da chuva seja drenada, reduzindo a ocorrência de inundações (Berntdsson, 2010).

Apesar de registros antigos mostrarem a técnica de se utilizar vegetação em coberturas, somente nas últimas décadas os telhados verdes vêm ganhando mais atenção. As primeiras pesquisas visaram a levantar os benefícios dos telhados verdes, e somente nos últimos anos foi comprovado que o desempenho deles depende de condições locais, como clima e características das construções (Hernandés e Luengas, 1997, Barrio, 1998, Blank et al., 2013). Portanto, um telhado verde projetado para uma determinada região provavelmente apresentará um desempenho diferente para outra com diferentes condições climáticas (Blank et al., 2013). Além disso, os telhados verdes comerciais disponíveis no mercado focam, principalmente, nos aspectos estéticos e acabam por não considerar todos os outros

benefícios, geralmente devido à falta de pesquisa e introdução prematura do produto no mercado (Vijayaraghavan, 2016). Adicionalmente, como parte de qualquer sistema construtivo sustentável, é essencial que se busquem melhorias nos materiais a serem aplicados. Nessa perspectiva, nota-se a utilização de materiais geossintéticos com diferentes funções nos telhados verdes (Townshend, 2007). Assim, percebe-se a necessidade do estudo do emprego de telhados verdes no âmbito nacional com o intuito de investigar os componentes que melhores se adaptam as condições locais, resultando em uma maior eficiência e durabilidade do sistema.

Usualmente, as pesquisas em telhados verdes foram conduzidas por meio de montagem de protótipos e monitoramento do seu desempenho com a utilização de simulações de chuvas ou pela análise de seu comportamento a partir de eventos de chuvas reais (Gregoire e Clausen, 2011, Morgan et al., 2013, Lee et al., 2013, Carpenter et al., 2016,). Além dos componentes que fazem parte do sistema, existem outros fatores que também influenciam na eficiência do telhado verde, principalmente em relação ao controle do escoamento e capacidade de retenção, tais como: inclinação, comprimento, posição e idade do telhado, período de seca, clima e intensidade e duração das chuvas. (Berndtsson, 2010). Entre esses fatores, pode-se destacar intensidade e duração das chuvas como elementos mais fáceis de se manipular através de simulações de chuva. Nessa perspectiva, espera-se que a capacidade de retenção do telhado verde seja maior para chuvas mais fracas e de menores intensidades (Villarreal e Bengtsson ,2005; Getter et al., 2007). Outro fator que também pode ser melhor estudado é a umidade do solo, uma vez que é possível deixar o solo em condições de estiagem por um determinado período para então realizar a simulação de chuva. Neste caso, a capacidade de retenção tender a crescer à medida que o telhado fica sem receber chuvas, até atingir um valor máximo após uma certa quantidade de dias (Lee et al., 2013).

Com a ampla quantidade de variáveis que influenciam no desempenho do telhado verde, sejam elas devido à característica do próprio telhado ou às condições climáticas locais, percebe-se a necessidade de investigar os componentes ideais para aplicação de telhados verdes no cenário nacional. A prática no Brasil ainda não é tão difundida quanto em países como Alemanha, Canadá e Japão. Já no começo da década de 2000, 17% das novas construções na Alemanha utilizavam telhados verdes, resultando em uma área total de 13 km² (Dawson, 2002). Em Toronto

(Canadá), construções com mais de 2000 m² de telhado devem incluir entre 20% e 60% de telhado verde. Em Tóquio (Japão), edificações privadas acima de 1000 m² e edificações públicas acima de 250 m² devem ter pelo menos 20% de telhado verde em relação à área total da cobertura. Caso contrário, será aplicada uma multa anual de 2 mil dólares (Vijayaraghavan, 2016).

No Brasil, algumas cidades possuem leis que tornam obrigatório o uso de telhados verdes. Em Recife, por exemplo, a Lei Municipal Nº 18.112/2015 define que edifícios com mais de quatro pavimentos não-habitacionais e área coberta acima de 400 m² possuam coberturas vegetadas e devem prever a implantação de telhado verde. Em Porto Alegre, está em tramitação um Projeto de Lei Complementar (PLCL 026/12) que obriga condomínios verticais com mais de 3 unidades agrupadas a dispor de telhado verde ou ecológico (Câmara Municipal de Porto Alegre, 2017). Dessa forma, pode-se dizer que a implementação de telhados verdes vem se tornando uma tendência entre cidades brasileiras mesmo antes de se conhecer de forma aprofundada modelos de telhados verdes que apresentem bom desempenho para a realidade local.

Assim, levando em conta os possíveis benefícios que os telhados verdes podem oferecer, percebe-se a necessidade de estudos envolvendo sua aplicação para que a sua utilização possa ser difundida com eficácia, e, com isso, promover a sustentabilidade.

Portanto, o objetivo geral desta pesquisa é analisar a capacidade de retenção de água de chuva de um telhado verde para as condições climáticas do litoral leste do Rio Grande do Norte. Utilizando um protótipo de telhado verde extensivo construído com geossintéticos, pretende-se também analisar a função entre o período de estiagem (relacionando-o ao teor de umidade do substrato) e a capacidade de retenção de água de chuva do protótipo, bem como avaliar a relação entre o volume de chuva precipitado e a capacidade de retenção de água de chuva do protótipo de telhado verde.

CAPÍTULO 2

Revisão da literatura

Telhados verdes ou telhados vegetados são coberturas vegetadas em que há a aplicação de um sistema vegetação-substrato sobre uma camada impermeável. O sistema de cobertura dos telhados verdes consiste em diversas camadas com diferentes funções e sua utilização promove vários benefícios ao meio ambiente e à própria construção.

2.1 Classificação dos telhados verdes quanto à espessura do substrato

Os telhados verdes são classificados em intensivos, semi-intensivos e extensivos. Os telhados intensivos possuem substratos de maior espessura e comportam vegetações de grande porte (como pequenas árvores e arbustos), gerando consideráveis sobrecargas no teto da edificação e gastos com manutenções. Os semi-intensivos estão classificados entre os intensivos e os extensivos. Eles utilizam substratos de média espessura, são mais caros que os extensivos e requerem manutenções frequentes, comportando plantas de médio porte, como herbáceas. Por sua vez, os telhados extensivos possuem substratos mais delgados e utilizam vegetações de menor porte (como gramíneas), resultando em menores gastos com manutenções (Morgan et al., 2013, Vijayaraghavan, 2016). A Figura 2.1 indica as principais características entre as diferentes classificações dos telhados verdes.

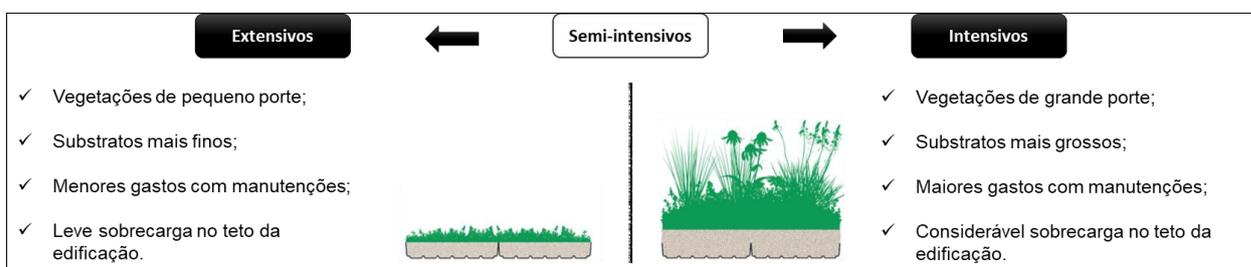


Figura 2.1: Imagem esquemática e características de telhados verdes extensivos, semi-intensivos e intensivos. (Adaptado de Green Roof Outfitters, 2017).

2.2 Componentes dos telhados verdes

Em geral, os telhados verdes são compostos por vegetação, substrato, meio filtrante, camada drenante e camada de isolamento. Caso necessário, ainda pode-se utilizar uma barreira contra raízes antes da camada de isolamento como reforço de proteção (Figura 2.2).

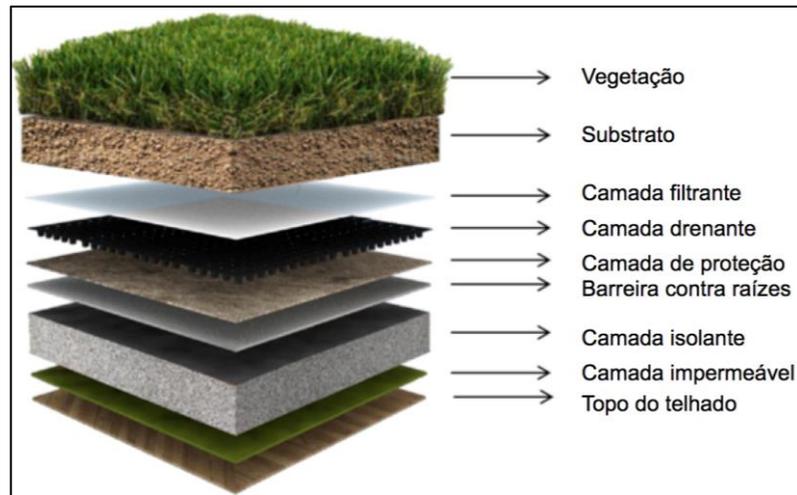


Figura 2.2: Componentes de um telhado verde. Adaptado de Vijayaraghavan (2016)

Segundo Vijayaraghavan (2016), a utilização de telhados verdes pode trazer diversos benefícios à edificação e ao meio que a circunda (e.g. auxílio no manejo de águas pluviais, isolamento térmico, melhoramento da qualidade da água de chuva, isolamento acústico e redução da poluição do ar, conforme pode ser visto na Figura 2.3).

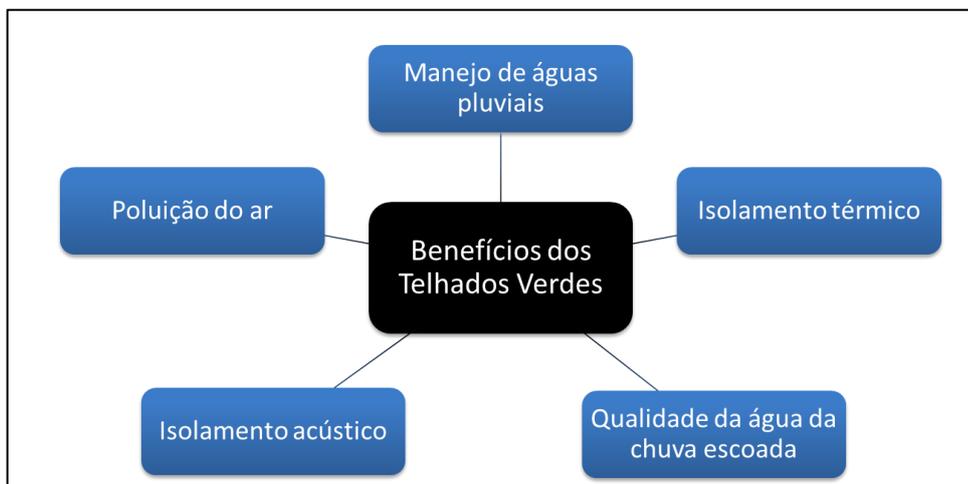


Figura 2.3: Principais benefícios oferecidos pelos telhados verdes.

2.2.1 Vegetação

O tipo de vegetação a ser utilizada pode melhorar a qualidade do escoamento, a qualidade do ar e o desempenho térmico do telhado (Dvorak e Vonder, 2010, Cook-Patton e Bauerle, 2012, Speak et al., 2013, Vijayaraghavan e Joshi, 2015). Porém, de acordo com Rowe (2011), os telhados verdes não apresentam condições adequadas para o crescimento de plantas devido às oscilações de disponibilidade de água no período entre chuvas e limitações quanto ao carregamento gerado, principalmente, pelas camadas de vegetação e substrato. Além disso, deve-se tomar cuidado para que não haja germinação de sementes de espécies que não estejam no projeto do telhado, de modo a evitar competitividade pelos recursos disponíveis. Portanto, é fundamental que as plantas utilizadas em telhados verdes tenham características como: resistir a períodos de seca, sobreviver com poucos nutrientes, cobrir maiores áreas, necessitar de poucas manutenções, multiplicar-se rapidamente e possuir raízes curtas e flexíveis (Vijayaraghavan, 2016).

Cook-Patton e Bauerle (2012) indicam o emprego de mais de uma espécie de planta em um mesmo telhado verde. Eles consideram que diferentes espécies de plantas utilizam os recursos (como nutrientes do solo, água, luz solar) de formas distintas. Logo, comunidades de plantas com diferentes características tendem a usar os recursos de forma mais eficiente. Butler e Orians (2011), por exemplo, fizeram comparações de índice de sobrevivência de plantas em cenários de telhados verdes utilizando só uma espécie de vegetação com situações em que houvessem mais de uma espécie por um período de três anos. Em seus estudos, eles mostraram que o índice de sobrevivência das plantas em um telhado verde com apenas a espécie *Agastache rupestris* ou *Asclepias verticillata* era menor do que quando as plantas de uma das espécies citadas fossem misturadas com plantas da espécie *Sedum Album*. Eles chegaram à conclusão de que em períodos favoráveis ao crescimento das plantas utilizadas, a *Sedum Album* age como competidora pelos recursos disponíveis. Porém, em períodos de seca, a *Sedum Album* auxilia as outras plantas e age como facilitadora, provavelmente devido a mecanismos da *Sedum Album* que resultam em redução de perda de água do solo. Com isso, sugere-se que a utilização de mais de uma planta pode vir a ser benéfico para a vida útil do telhado verde. Porém, são necessários estudos que identifiquem os mecanismos de utilização de recursos para cada combinação de espécies nas condições climáticas locais.

2.2.2 Substrato

O substrato também tem forte influência sobre o desempenho do telhado verde, pois está diretamente ligado ao crescimento da vegetação e é responsável por promover benefícios, como melhoria da qualidade do escoamento, redução do fluxo máximo do escoamento, e funcionamento como isolante térmico e acústico (Dunnett e Kingsbury (2004), Berndtsson (2010), Aitkenhead-Peterson et al. (2011), Bates et al. (2013). Assim como a vegetação, a composição do substrato também deve se adequar às condições climáticas locais. Também devem ser tomadas precauções para que o substrato tenha nutrientes necessários que favoreçam o crescimento da vegetação (Nagase e Dunnet, 2011).

Ademais, cuidados não de ser tomados para que o substrato permita a fixação e desenvolvimento das plantas sem gerar carregamentos elevados na estrutura do telhado verde. Logo, é indicado que a composição do substrato não resulte em um material de alta densidade e que o mesmo possa propiciar uma alta taxa de retenção de água de chuva (Lucket, 2009, Farrel et al., 2013). De acordo com Vijayaraghavan (2016), altas taxas de matéria orgânica e elevado volume e largura de substrato aumentam a taxa de retenção de água do meio.

Vijayaraghavan e Raja (2014) afirmam que o substrato é o principal componente do telhado verde, responsável por alterar a qualidade da água do escoamento. Graceson et al. (2013), por sua vez, analisou o desempenho de telhados verdes com diferentes configurações e determinou que a capacidade de retenção de um telhado verde muda mais significativamente quando se utilizam substratos com diferentes propriedades físicas (como o tamanho dos poros) do que quando se utilizam diferentes espécies de vegetações. Logo, sugere-se que alternativas de misturas de substrato sejam analisadas com a finalidade de obter uma combinação com propriedades físicas otimizadas e capaz de produzir uma água escoada com menos contaminantes em relação ao escoamento de um telhado convencional.

Em sua pesquisa, os referidos autores analisaram dezoito substratos compostos por misturas com diferentes percentuais de vermiculita esfoliada, perlita expandida, tijolo esmagado e areia com fibra de coco. A partir da análise de parâmetros como densidade, capacidade de retenção, porosidade, condutividade hidráulica e análise da qualidade do *runoff*, eles concluíram que o substrato obtido a

partir da mistura de 20% de vermiculita, 30% de perlita, 20% de tijolo esmagado, 10% de areia e 20% de fibra de coco foi o que apresentou melhores propriedades, como baixa densidade e alta capacidade de retenção. Portanto, sugere-se que, com a variabilidade das características dos componentes do substrato, uma combinação dos mesmos pode ser feita para se obter um substrato ideal para a espécie de vegetação a ser utilizada, a partir de análises das suas propriedades físicas e químicas.

Farrel et al. (2013) estudou a aplicação de grânulos de silicato e hidrogel em dois tipos de substrato (escória e tijolo esmagado) e dois tipos de vegetação (tremoço branco e trigo de inverno) visando a avaliar a melhoria do desempenho do telhado verde quanto à capacidade de retenção, quantidade de água disponível para a planta e quantidade de dias sem água até que a planta murche permanentemente. Os resultados mostraram que os grânulos de silicato aumentaram a capacidade de retenção tanto nos telhados com escória quanto nos de tijolo esmagado, enquanto que a aplicação de hidrogel aumentou a capacidade de retenção somente no telhado com escória. Os autores chegaram à conclusão que os benefícios dos aditivos são específicos para cada espécie de planta e cada tipo de substrato, comparando o crescimento e cobertura total das plantas utilizadas na pesquisa em questão com a cobertura e crescimento de plantas utilizadas por outros pesquisadores, com a aplicação do mesmo aditivo.

Quanto à espessura do substrato, espera-se que telhados verdes com substratos mais espessos apresentem maiores eficiências com relação à remoção de poluentes da água de chuva escoada em um telhado convencional. Seidl et al. (2013) compararam a eficiência de dois telhados verdes similares com espessuras de 6 cm e 16 cm, com um telhado convencional. Seus resultados mostraram que ambos telhados verdes apresentaram *runoffs* com maiores índices de fosfato, carbono e nitrogênio orgânico em relação ao telhado convencional, mas com metais pesados em quantidades menores, os quais têm suas origens na atmosfera ou na superfície dos telhados convencionais. Comparando os dois telhados verdes estudados com o telhado convencional, os telhados verdes apresentaram *runoffs* com maiores concentrações de fosfatos, carbono e nitrogênio orgânico, mas menores concentrações de metais. Comparando os dois telhados verdes utilizados entre si, o telhado de maior espessura (16 cm) apresentou esse efeito de forma mais pronunciado em comparação com o de 6 cm.

Em relação à capacidade de retenção, telhados com substratos de maior espessura tendem a reter mais água. Contudo, pesquisas realizadas por Morgan et al. (2013) mostraram que há um limite de espessura para o qual telhados verdes podem começar a apresentar menor eficiência. Para os referidos autores, telhados com substratos mais espessos podem acomodar uma gama maior de espécies, mas a maior espessura acarreta em um maior peso para a estrutura do telhado. Os resultados de suas pesquisas mostraram que, entre um telhado controle com substrato de 5 cm de altura (denominado 5cm-C) e telhados verdes com substratos de espessuras de 5, 10, 15 e 20 cm, o telhado de 15 cm foi o que apresentou maior capacidade de retenção, com valores semelhantes aos dos substratos de 10 cm e 20 cm de espessura (Figura 2.4).

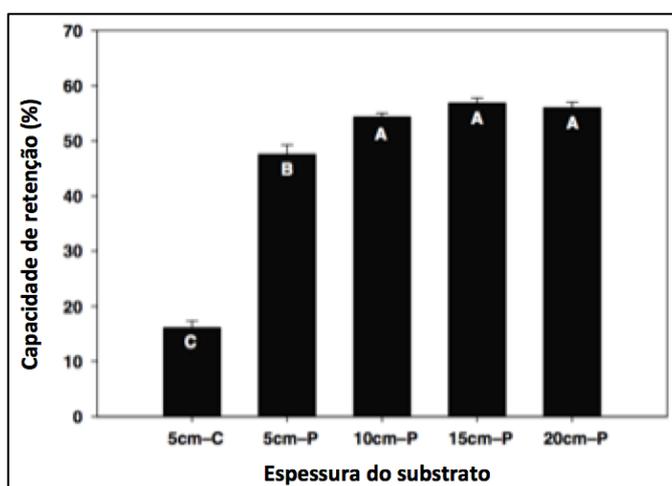


Figura 2.4: Capacidade de retenção em telhados verdes com diferentes espessuras de substrato (P) e um telhado controle (C). Adaptado de Morgan et al. (2013)

Apesar disso, a diferença entre a capacidade de retenção entre o telhado com substrato de 15 cm foi apenas 15% maior do que a capacidade de retenção do telhado com substrato de 10 cm. Ademais, os autores citados mostraram que a espessura do substrato influencia no crescimento da planta, onde a vegetação no telhado com espessura de 5 cm apresentou um percentual de cobertura de 77,6% mesmo em um período de quase 3 anos, enquanto que a vegetação no telhado com espessura de 10 cm conseguiu atingir quase a totalidade da área de cobertura (Tabela 2.1).

Dessa forma, pode-se afirmar que a espessura do substrato não deve ser tão pequena a ponto de comprometer o crescimento da planta, mas também não tão alta

a ponto de acrescentar mais peso e, conseqüentemente, custo para o telhado, sem que haja uma melhoria na capacidade de retenção.

Tabela 2.1 – Percentual de cobertura de telhados verdes com diferentes espessuras de substrato entre Setembro/2005 e Junho/2008. Adaptado de Morgan et al. (2013).

Área de Cobertura Média da Vegetação no Telhado Verde (%)				
Espessura do Substrato	Set./2015	Nov./2016	Jun./2007	Jun./2008
5 cm	19,6	52,4	63,9	77,6
10 cm	21,4	75,0	89,2	99,4
15 cm	25,9	82,3	93,1	99,8
20 cm	23,1	83,2	96,7	100,0

2.2.3 Camadas funcionais

O meio filtrante tem como principal função separar o substrato da camada drenante, assegurando que não haja passagem de partículas finas do solo. De acordo com Townshend (2007), geotêxteis são frequentemente empregados com função filtrante em telhados verdes, visto que são materiais fabricados com porosidade conhecida e são capazes de suportar a carga da camada vegetal e do substrato.

Ainda segundo Townshend (2007), a camada drenante subsequente à filtrante serve para garantir o balanço hídrico do telhado verde, removendo o excesso de água presente no mesmo. Essa camada também serve como proteção para a camada impermeável e melhora as propriedades térmicas do telhado verde.

Em telhados verdes, para promover a drenagem da água de chuva, geralmente, utilizam-se materiais granulares ou geocompostos drenantes. Para Lockett (2009), os materiais granulares apresentam diversas desvantagens, como alto custo, dificuldade de instalação e maior sobrecarga sobre o telhado, enquanto os geocompostos são de mais fácil transporte, manuseio e apresentam menor acréscimo de peso à estrutura.

Além desses componentes, os telhados verdes ainda devem ter uma camada impermeável e uma barreira contra raízes (Townshend, 2007). A camada impermeável serve para evitar infiltrações no teto das edificações. Ela pode ser composta de diversos materiais, como membrana de betume modificado, feltro

betumado, feltro com manta asfática, membrana líquida de poliuretano e geossintéticos (Lockett, 2009).

Por sua vez, a barreira contra raízes evita que haja a penetração de raízes da vegetação na estrutura do teto. Nessa perspectiva, tecidos e termoplásticos são alguns dos materiais que podem funcionar como barreira contra raízes. Materiais tecidos são mais indicados para telhados verdes extensivos, os quais possuem plantas menores, como plantas do gênero *Sedum* ou suculentas com raízes de estrutura fibrosa. Materiais termoplásticos são mais caros, porém garantem uma maior proteção contra raízes mais agressivas e de plantas maiores. Sua aplicação deve ser feita abaixo da camada drenante e acima da camada impermeável (Lockett, 2009).

2.2.4 Aplicação de geossintéticos nas camadas funcionais

Segundo a ABNT, a Norma Brasileira de terminologia de geossintéticos (NBR 12553/2003) define geossintéticos como produtos industrializados com pelo menos um de seus componentes fabricados com polímero sintético ou natural. Devido a sua versatilidade, são itens utilizados em contato com o solo ou com outros materiais e são amplamente aplicados na Engenharia Civil, Geotécnica e Ambiental.

Estando em processo contínuo de melhoria de desempenho, os geossintéticos oferecem confiabilidade e controle de qualidade em seu uso, além de oferecer otimização do tempo de execução de obras devido a sua facilidade de manuseio. A seleção dos mesmos para atender às exigências de sua aplicação deve se basear em propriedades de engenharia que traduzam as condições técnicas a que serão submetidos quando em serviço. Neste caso, essas propriedades são determinadas a partir de ensaios de campo e de laboratório, de modo que eles possam reproduzir sua função com o meio ao qual ele está inserido.

Entre as principais funções desempenhadas pelos geossintéticos, pode-se listar: separação, filtração, drenagem, reforço, barreira e proteção (IGS Brasil, 2017). Apesar de um determinado tipo de geossintético apresentar uma função primária, existem casos em que um mesmo material pode exercer dupla função. Os geotêxteis, por exemplo, podem desempenhar função de separação e filtração. Há ainda os geocompostos, que são geossintéticos associados para desempenhar uma ou mais funções (e.g. geocompostos drenantes). Eles constituem-se em uma associação de

camadas sobrepostas com diferentes funções. No caso, o geocomposto drenante possui uma camada de geotêxtil (função de filtração) sobre uma camada de geoespaçador (drenagem), a qual fica sobreposta a uma camada de geotêxtil (separação).

Para aplicação em telhados verdes, pode-se destacar a utilização de geossintéticos para as funções de separação, filtração, drenagem e barreira. Em estudos realizados por Louzada (2016), por exemplo, foram utilizados geotêxteis para camadas filtrantes e/ou drenante, geocompostos (uma camada de geomanta entre duas camadas de geotêxtil não-tecido) para camadas drenantes e geomembranas para camadas de barreira.

A utilização de geossintéticos na aplicação de telhados verdes se dá pela versatilidade, controle de qualidade e pelo conhecimento de suas propriedades mecânicas e hidráulicas, tornando-se opção viável, tendo em vista os carregamentos atuantes e condições de drenagem frente ao seu custo e facilidade de obtenção e de execução.

2.3 Benefícios dos telhados verdes

2.3.1 Manejo de águas pluviais

De acordo com Berndtsson (2010), a utilização de telhados verdes altera o *runoff* decorrente da água de chuva, diminuindo o seu volume de pico e atrasando-o (Figura 2.5). Logo, pode-se observar que há uma diferença tanto no volume quanto no tempo de pico da curva de um *runoff* gerado em um telhado convencional (linha contínua) e volume de pico e tempo de pico em um telhado verde (linha tracejada). Isso ocorre porque parte da água da chuva será retida pela planta ou pelo substrato. A água retida pela planta participará de processos de evaporação, evapotranspiração, ou será absorvida pela própria planta. Outra porção será levada para o substrato, que também poderá reter a água em seus poros, sendo o restante da água da chuva levada para os próximos elementos do telhado verde. A água utilizada para evaporação e evapotranspiração resulta na diminuição do volume total de escoamento e os principais fatores que influenciam na capacidade de retenção do telhado verde e na sua dinâmica de *runoff* são:

- Características do telhado verde: número de camadas e tipo dos materiais, altura do substrato, tipo de substrato, tipo de vegetação, geometria do telhado, inclinação do telhado e idade do telhado;
- Condições climáticas: período de estiagem, clima (temperatura atmosférica, umidade, vento) e características da chuva (intensidade e duração).

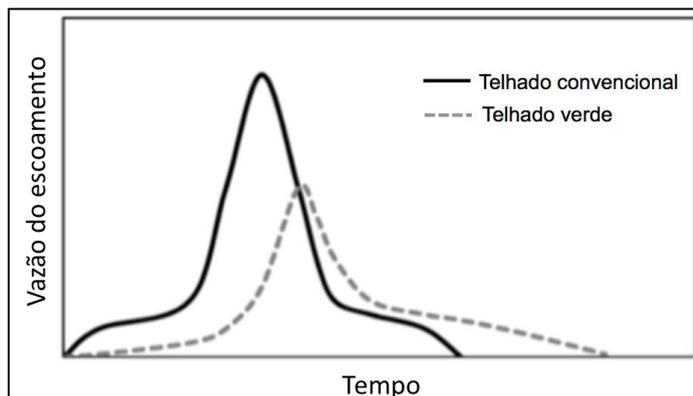


Figura 2.5: Diferença de curvas de volume de vazão do escoamento x tempo entre telhado convencional (linha contínua) e telhado verde (linha tracejada). Adaptado de Berndtsson (2010).

Segundo Stovin (2010) e Stovin et al. (2012), a intensidade da chuva, o volume de chuva e o período de estiagem são fatores que influenciam fortemente o desempenho do telhado verde quanto à sua capacidade de retenção. Conforme os autores, o período de estiagem é um fator determinante na capacidade de retenção, vazão de pico do escoamento e atraso do escoamento.

Apesar da vasta quantidade de estudos existentes sobre telhados verdes, torna-se difícil a comparação entre os resultados obtidos, tendo em vista a gama de variáveis que interferem no seu desempenho. Ainda assim, considerando que na maior parte dos casos se analisa o desempenho do telhado verde com base no coeficiente de *runoff* ou na capacidade de retenção, pode-se ter como base alguns resultados encontrados na literatura presente.

O coeficiente de runoff significa o percentual do volume precipitado que é convertido em escoamento superficial. Segundo Kolb (2003), os valores do coeficiente de runoff de um telhado convencional varia entre 0,8 e 1,0. Para o autor, os telhados verdes extensivos podem apresentar valores desse coeficiente 0,5, ao passo que telhados intensivos apresentam valores próximos a 0,7.

Em pesquisa realizada por Lee et al. (2013) os resultados mostraram que um telhado de concreto apresentou coeficiente de runoff de 0,91 ao passo que os valores para um telhado verde extensivo, após 3 dias de estiagem, foram, em média, 0,00, 0,48 e 0,69 para chuvas com volumes de 10, 50 e 95 mm, respectivamente.

A capacidade de retenção, por outro lado, mede o percentual do volume de chuva precipitado que foi retido pelo telhado verde. Estudos realizados por Mentens et al. (2006) na Alemanha mostraram que telhados verdes intensivos podem apresentar uma capacidade de retenção entre 65% e 85% da precipitação total, enquanto que telhados verdes extensivos podem apresentar redução de *runoff* entre 27% e 81% quando comparados com um telhado convencional em ambos os casos. Ademais, eles modelaram uma equação que representasse a quantidade de *runoff* anual (RO), em milímetros, com base em estudos de 125 casos, onde:

$$RO = 693 - 1,15P + 0,001P^2 - 0,8S \text{ (Equação 2.1)}$$

Em que P é a precipitação anual em mm e S é a espessura do substrato. Com isso, eles utilizaram a precipitação anual média de Bruxelas, na Bélgica, para estimar a contribuição que a utilização de telhados verdes com substratos de 100 mm aplicados em 10% das edificações teria sobre a capital. Os resultados mostraram que a aplicação de telhados verdes em 10% das edificações propiciaria uma redução em 2,7%. Os autores afirmam que a utilização de telhados verdes por si só não resolve os problemas relacionados à gestão de água de chuva, mas que a técnica deve ser complementada com reservatórios de detenção, lagoas de captação e áreas verdes que permitam a infiltração e evapotranspiração da água de chuva.

Gregoire e Clausen (2011) fizeram um levantamento de pesquisas com telhados verdes extensivos dos Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Alemanha e Suécia. Os números mostraram que a capacidade de retenção dos telhados em questão variou entre 34% e 69%, com média de 56% (Figura 2.6). Utilizando um telhado verde modular com área de 248 m², localizado em um edifício público da Universidade de Connecticut, Storrs, Estados Unidos, os autores coletaram amostras de 97 eventos de chuvas reais, entre 25 de janeiro de 2009 a 1 de fevereiro de 2010, com precipitação média de 4,96 mm, e concluíram que o telhado verde em questão apresentou uma capacidade de retenção média de 51,4%, extrapolando a área de cobertura da vegetação no telhado de 81% para 100%.

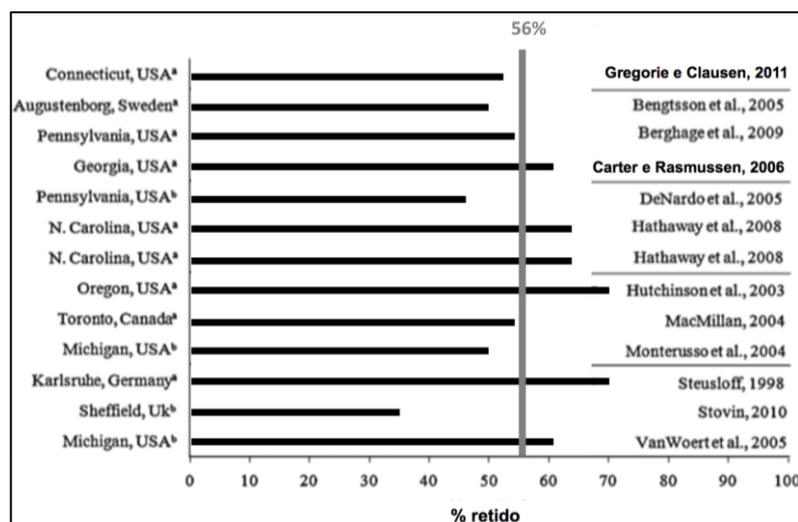


Figura 2.6: Capacidade de retenção de telhados verdes extensivos em pesquisas de diferentes países. Adaptado de Gregoire e Clausen (2011).

Lee et al. (2013) utilizaram telhados verdes extensivos para analisar a sua capacidade de retenção em ensaios que simulassem eventos de chuvas reais para as condições reais da Coreia do Sul nas estações de primavera, outono e verão. As chuvas simuladas tiveram durações entre 1 e 11 h e intensidades entre 2 e 40 mm/h. Além disso, os autores também analisaram a capacidade de retenção do telhado verde em função de períodos de estiagem que variaram entre 1 e 5 dias.

Para chuvas simuladas nas condições de período de estiagem de 5 dias e uma curta pré-irrigação de 10 mm, o telhado verde apresentou 100% de retenção para chuvas de precipitações de até 20 mm com durações de até 3 h. Nessa condição de estiagem, o telhado verde apresentou escoamento apenas para chuvas de 30 a 35 mm de precipitação, tendo uma capacidade de retenção média de 29%. Para a condição de 3 dias de estiagem e pré-irrigação de 35 mm, o telhado verde apresentou valores de capacidade de retenção de 100% para chuvas de 3 h de duração e precipitação de 10 mm, 10% para chuvas de 6 h de duração e 150 mm de precipitação, e 29% para chuvas de 11 h de duração e precipitação de 95 mm. Na condição de 1 dia de estiagem e pré-irrigação de 100 mm, o telhado verde apresentou 9% de retenção para uma chuva de 2 h de duração com precipitação de 80 mm. Além disso, os autores indicaram que o telhado verde estudado possuía uma capacidade de retenção que aumentava linearmente de 1 dia de período de estiagem até 3 dias de período de estiagem, quando atingia uma capacidade de retenção máxima de 28 mm de água de chuva (Figura 2.7)

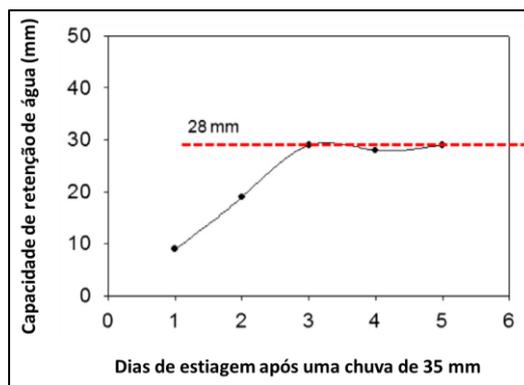


Figura 2.7: Aumento da capacidade de retenção de água de um telhado verde com o aumento de períodos de estiagem até o terceiro dia. Adaptado de Lee et al. (2013).

De acordo com Villarreal e Bengtsson (2005), quanto menor a intensidade da chuva, e menor inclinação do telhado verde extensivo, maior a capacidade de retenção do telhado. Para chuvas de intensidade de 24 mm/h, a retenção de um telhado verde variou de 62% para inclinações de 2° a 39% para inclinações de 14°. Aumentando-se a intensidade da chuva para 78 mm/h, a retenção do mesmo telhado variou de 21% para inclinações de 2° e 10% para inclinações de 14° (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Percentual de retenção de telhados verdes com diferentes inclinações e com chuvas de diferentes intensidades. Adaptado de Villarreal e Bengtsson (2005).

Inclinação	Duração (min)	Intensidade da Chuva (mm/h)	Retenção (%)
2°	60	24	62
	30	48	54
	30	78	21
8°	50	24	43
	30	48	30
15°	60	24	39
	60	48	21
	60	78	10

Getter et al. (2007) utilizaram 12 módulos de telhados verdes extensivos com inclinações que variaram entre 2% e 25%. Os autores categorizaram as intensidades de precipitação das 62 chuvas coletadas em eventos de 6h como fracas (< 2 mm), moderadas (2 mm – 10 mm) e fortes (> 10 mm). A partir de coleta de eventos de chuvas reais, seus resultados mostraram que a capacidade de retenção era menor

para chuvas mais intensas e inclinações maiores. Em média, a capacidade de retenção do telhado verde foi reduzida de 94,2% em chuvas fracas para 63,3% em chuvas fortes. Com relação às inclinações, de modo geral, a capacidade de retenção variou de 85,2% em inclinações de 2% para 75,3% em inclinações de 25% (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Percentual de retenção de telhados verdes com diferentes inclinações e com chuvas de diferentes intensidades. Adaptado de Getter et al. (2007).

Inclinação	Intensidade			Média
	Fraca	Moderada	Forte	
2%	93,3%	92,2%	71,4%	85,5%
7%	94,0%	89,5%	66,4%	82,2%
15%	94,0%	88,6%	58,4%	78,0%
25%	95,5%	87,8%	57,1%	75,3%
Média	94,2%	89,5%	63,3%	80,2%

A partir dos dados da Tabela 2.3, percebe-se que a inclinação do telhado possui uma maior influência na capacidade de retenção para intensidades das precipitações mais fortes. Para os casos de chuvas moderadas e intensas, há uma tendência de que a curva da capacidade de retenção x inclinação se torne uma assíntota à medida que a inclinação aumenta. Para chuvas de baixa intensidade, a capacidade de retenção não apresenta variações consideráveis à medida que se aumenta a inclinação (Figura 2.8).

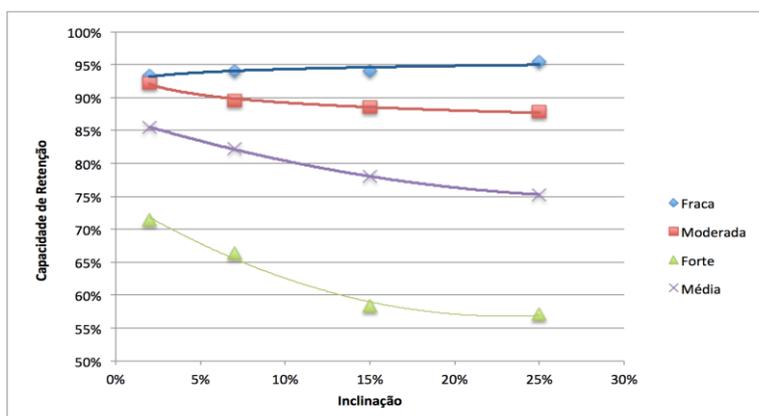


Figura 2.8: Percentual de retenção de telhados verdes com diferentes inclinações e com chuvas de diferentes intensidades. Dados obtidos de Getter et al. (2007).

No âmbito nacional, pode-se citar a pesquisa realizada por Lima (2013), em Caruaru, Pernambuco, que analisou a capacidade de retenção para eventos de chuvas reais em dois telhados verdes com diferentes tipos de vegetação: um com a espécie babosa (*Aloe vera*) e outro com coroa-de-frade (*Melocactus zehntneri*). Os resultados mostraram que o telhado verde com a vegetação do tipo babosa apresentou capacidades de retenção entre 15,57% a 77,77%, enquanto o telhado verde com a vegetação do tipo coroa-de-frade apresentou capacidades de retenção entre 28,12% e 100% (Figura 2.9). A autora justificou que o principal fator que influenciou na variação da capacidade de retenção dos telhados verdes estudados foi a umidade. Apesar de não ter medido a umidade para cada caso, foi ressaltado que a capacidade de retenção de 100% apresentado pelo telhado com a vegetação coroa-de-frade coincidiu com o período de menor precipitação acumulada entre as coletas realizadas.

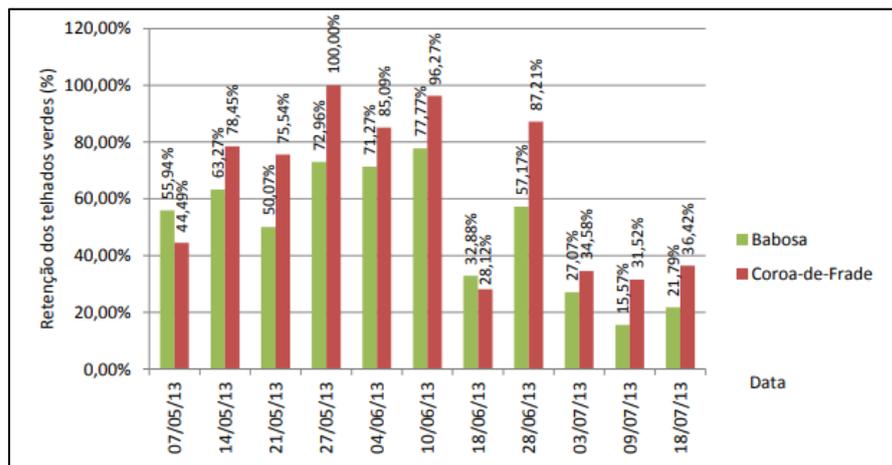


Figura 2.9: Percentual de retenção de dois telhados verdes com diferentes vegetações.

Fonte: Lima (2013).

Ferreira (2015), em pesquisa realizada em Campo Mourão, Paraná, utilizou telhados verdes extensivos com grama esmeralda para comparar a quantidade de água escoada e o atraso do escoamento da água de chuva do telhado verde em questão com um telhado verde de fibrocimento. Em sua pesquisa, foram analisados 5 eventos de chuva durante um período de 31 dias. O referido autor considerou que o substrato tinha um aspecto úmido quando ocorria evento de chuva com um período de estiagem superior a 4 dias; aspecto seco, quando a chuva acontecia em um período de estiagem entre 1 e 4 dias; aspecto saturado, quando a chuva acontecia até 1 dia antes da coleta dos dados. Nas ocasiões em que houve escoamento,

verificou-se que o telhado verde atrasou o início do escoamento entre 5min59s e 44min13s. Quanto à capacidade de retenção, o telhado verde apresentou 100% de retenção para o substrato na condição seca, 71 e 87,5% na condição úmida e 55 e 95% na condição saturada.

Moruzzi et al. (2014) analisaram o efeito da umidade antecedente do substrato e da inclinação na capacidade de retenção em telhados verde. Em sua pesquisa, os autores utilizaram o medidor de umidade Speedy para verificar a umidade do solo antes e após eventos de simulações de chuva. Foram realizados 14 ensaios de simulações de chuva com durações de 30 min e precipitações de 51,8 mm em protótipos de 1 m² em inclinações de 10, 20 e 30 %. Os resultados mostraram que o acréscimo de umidade avaliado no substrato após a simulação variou de 0,8 a 19%, sendo os maiores valores registrados para os casos em que o substrato estivesse mais seco (com valores de umidade antecedente de 1,1 %). As capacidades de retenção calculadas para o substrato com menores índices de umidade apresentaram maiores capacidades de retenção para todas as inclinações utilizadas (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Valores de variação de umidade e capacidade de retenção em função da inclinação e da umidade inicial em telhados verdes. Adaptado de Moruzzi (2014).

Inclinação (%)	Umidade Inicial (%)	Variação de Umidade	Capacidade de Retenção (%)
10	1,1	17,7	98,4
	18,0	2,8	100,0
	18,4	2,0	98,1
	19,6	4,4	99,6
	21,2	7,6	98,3
20	1,1	16,5	91,3
	12,4	1,2	57,5
	15,2	4,4	82,6
	17,2	3,2	59,4
	18,4	7,6	61,3
30	1,1	8,0	84,5
	13,6	25,0	41,7
	16,0	23,0	55,6
	17,6	23,0	55,6
	19,6	11,0	78,7

Para a localidade de Natal, Rio Grande do Norte, Louzada (2016) realizou simulações de chuva em um protótipo de telhado verde extensivo com aplicação de geotêxtil (denominado como MVGT – Módulo Vegetado Geotêxtil). Os resultados mostraram uma retenção superior a 83% para chuvas entre 0,74 mm/min e 1,09 mm/min, com inclinações de 2% (considerado como plano) e de 20%, quando comparados com o módulo controle (MC), conforme mostra a Figura 2.10:

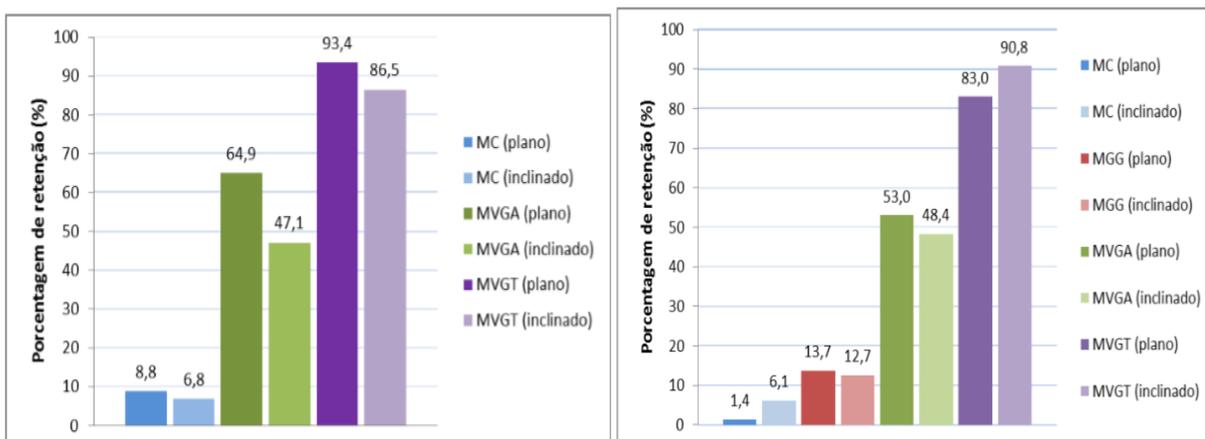


Figura 2.10: Percentual de retenção de telhados verdes extensivos com geotêxtil (em lilás, MVGT) com chuvas de 20min (à esquerda) e 30min (à direita) (Louzada, 2016).

Miranda (2016), utilizando o mesmo protótipo com geotêxtil (MVGT), realizou simulações de chuva com intensidade média de 0,3 mm/min por 30min e obteve resultados de percentual de retenção para chuvas simuladas com períodos de estiagem de 4, 6 e 8 dias. Os resultados mostraram que o percentual de retenção variou de 43,4% a 64,7% para os períodos de estiagem 4 e 8 dias, respectivamente (Figura 2.11a). Além disso, Miranda (2016) constatou que os tempos de início de escoamento aumentava para as simulações em que o protótipo apresentava mais dias sem receber chuva, variando de 42 minutos para 4 dias sem chuva a 67 minutos para 8 dias sem chuva. Independentemente do tempo de estiagem, os telhados apresentavam tempo de início de escoamento superior aos 30 minutos, como mostra a Figura 2.11b.

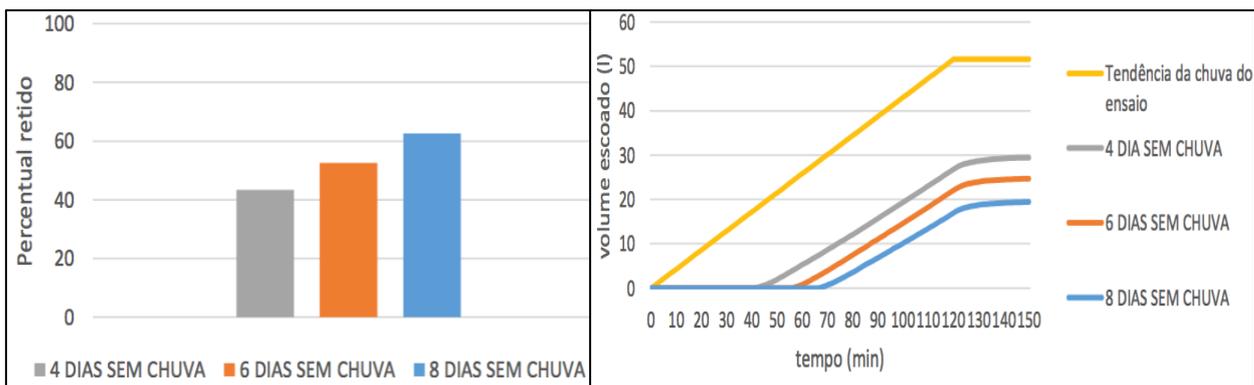


Figura 2.11: a) À esquerda, percentual de retenção do telhado verde em função do período de estiagem e b) À direita, volume de escoamento em função do tempo para diferentes períodos de estiagem. (Miranda, 2016).

2.3.2 Isolamento térmico

Os telhados verdes, quanto ao seu desempenho como isolante térmico, não apenas contribuem para o conforto térmico, mas também propiciam benefícios econômicos devido à redução de gastos com equipamentos de controle de temperatura, como mostram Niachou et al. (2001). De acordo com a pesquisa, que foi realizada na Grécia, os telhados verdes reduziram a energia utilizada para controle de temperatura interna de 2% a 48%.

Estudos realizados por Ekaterini e Dimitris (1998) mostraram que a radiação solar total absorvida pela vegetação de um telhado verde, 27% foi refletida, 60% absorvida pela vegetação e 13% transmitida para o substrato.

Além de proporcionar o isolamento térmico entre o ambiente interno e externo de uma edificação, os telhados verdes também contribuem para mitigar os efeitos de ilhas de calor em centros urbanos, diminuindo a temperatura do ar. De acordo com Saadatian et al. (2013), os telhados verdes podem combater as ilhas de calor e aumentar o índice de albedo de centros urbanos. Segundo Santamouris (2014), os telhados verdes poderiam reduzir a temperatura do ambiente entre 0.3°C e 3°C.

2.3.3 Qualidade da água da chuva escoada

Para Vijayaraghavan (2016), a qualidade da água escoada depende principalmente da relação entre a concentração de íons presentes na chuva e no substrato. Tanto o substrato quanto a vegetação podem atuar como filtro, limpando a água da chuva de alguns poluentes. Porém, isso apenas ocorre quando a

concentração de íons da chuva é maior do que a concentração de íons do substrato. Logo, se ocorrer o contrário, ou seja, se a concentração de íons da chuva for maior do que a do substrato, a troca de íons entre a chuva e o substrato resultará num escoamento com maior concentração de poluentes. Além dessa troca de íons, a magnitude de contaminantes no *runoff* depende também de fertilizantes utilizados para manutenção do telhado verde, de micróbios presentes no solo do substrato, tipo e idade do substrato.

Apesar de alguns pesquisadores afirmarem que os telhados verdes podem melhorar a qualidade da água da chuva escoada para drenagem, retendo alguns poluentes, outros pesquisadores acreditam que esta afirmação não pode ser validada para todos os casos (Berndtsson, 2010).

Em pesquisa realizada por Van Seters et al. (2009), foram examinadas amostras de escoamento de *runoff* de telhados verdes extensivos, analisando o seu PH, total de sólidos suspensos, metais, nutrientes e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. Em comparação com um telhado convencional, os resultados para o *runoff* do telhado verde mostraram valores inferiores da maioria dos poluentes, exceto para cálcio manganês e fósforo.

Moran et al. (2003) classificaram, numa pesquisa de 9 meses de duração, telhados verdes como a melhor técnica para retenção de água de chuva. Porém, seus resultados mostraram um escoamento com mais poluentes do que a água da chuva.

Os principais aspectos que influenciam na qualidade do escoamento do telhado verde são: tipo de substrato, tipo de vegetação, intensidade da chuva, fontes de poluição local, tipo de telhado verde, fertilização e práticas de manutenção, idade do telhado verde, propriedades físicas e químicas dos poluentes e tipo de drenagem. Dentre todos esses fatores, os que desempenham maior importância quanto à qualidade da água são os tipos de substrato e vegetação (Vijayaraghavan, 2016).

2.3.4 Isolamento acústico

Apesar de não ser o principal objetivo dos telhados verdes, a redução da poluição sonora também é um fator positivo, propiciado pela utilização daqueles. Segundo Yang et al. (2012), os telhados verdes geralmente atenuam a poluição sonora advinda de rodovias, ferrovias e tráfego. Esse benefício, porém, é limitado pela espessura do telhado verde. Van Renterghem e Botteldooren (2008), por exemplo,

realizaram estudos em telhados verdes extensivos e intensivos com o objetivo de analisar a influência da altura do telhado verde com o isolamento acústico. Os resultados mostraram que o telhado verde apresenta uma boa redução sonora para telhados extensivos (entre 15 cm e 20 cm); contudo, concluiu-se que não há uma melhora do isolamento acústico para os telhados intensivos (maiores do que 20 cm) quando comparado-os com os extensivos.

Tentando quantificar a magnitude da redução da poluição sonora, Conelly e Hodgson (2013) realizaram experimentos em telhados verdes com diferentes alturas de substrato, teores de umidade e tipos de vegetações, e descobriram que a utilização de telhados verdes resultava numa redução de 10 dB a 20 dB em comparação a um telhado convencional.

2.3.5 Poluição do ar

Em relação ao combate à poluição do ar, as plantas dos telhados verdes podem atuar de forma direta, por meio do consumo de gases poluentes, ou indireta, como por meio da modificação de microclimas, como afirma Yang et al. (2008). Os citados autores quantificaram a remoção de 1675 kg de poluentes por telhados verdes que cobriam uma área de 19,8 ha em um período de um ano. De acordo com Li et al. (2010), em um dia ensolarado, telhados verdes podem reduzir a concentração de dióxido de carbono (CO₂) em até 2% nas regiões próximas.

2.4 Dificuldades na implementação dos telhados verdes

Em estudos realizados por Zhang et al. (2012), as principais barreiras encontradas na implementação de telhados verdes em Hong Kong são a falta de incentivo do governo à promoção da utilização de telhados verdes e seus elevados custos de manutenção. Eles alegam que, apesar de existirem dificuldades no processo de planejamento, construção e operação dos telhados verdes, as barreiras devem ser superadas devido à gama de benefícios que os telhados verdes oferecem.

Similarmente, Williams et al. (2010), na Austrália, afirmam que uma das principais dificuldades na implementação de telhados verdes no país em questão é devido à falta de pesquisas científicas envolvendo telhados verdes para as condições locais. Aliada à falta de pesquisa, há também a falta de experiência, conhecimento e

comunicação entre indústrias de telhados verdes e a falta de normas técnicas. Além disso, os autores listam soluções para superar as barreiras e afirmam que a Austrália pode ter muito a ganhar com os telhados verdes.

No Brasil, está em tramitação o Projeto de Lei 1703/2011, o qual torna obrigatório em todo território nacional a previsão de construção de telhados verdes em projetos de condomínios verticais com mais de três unidades agrupadas verticalmente (Câmara dos deputados, 2017). Em 2014, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) se posicionou contra a aprovação do PL 1703/2011. Entre os argumentos do CBCS, pode-se citar a insipiência da cadeia de fornecedores de componentes de telhados verdes, consequências na má instalação do telhado verde, aumento do custo com instalação e manutenção do telhado verde e ausência de normas técnicas específicas. A tabela 2.5 mostra um resumo das dificuldades encontradas nos três lugares citados. Logo, percebe-se novamente que parte dos argumentos que dificultam a implementação de telhados verdes são devido à falta de conhecimento, pesquisa e capacitação técnica dos profissionais da área.

Tabela 2.5 – Dificuldades encontradas na implementação de telhados verdes na Austrália, em Hong Kong e no Brasil.

Lugar	Austrália	Hong Kong	Brasil
	Falta de fornecedores	Falta de incentivo do governo	Falta de conhecimento pelos fornecedores
Dificuldades	Falta de pesquisa científica	Elevado custo de manutenção	Elevado custo de manutenção e instalação
	Falta de normas técnicas	Elevado custo de instalação	Falta de normas técnicas

CAPÍTULO 3

Metodologia

A pesquisa foi dada por meio de simulações de chuva em um protótipo de telhado verde instalado no Universidade Federal do Rio Grande do Norte, no município de Natal/RN (Figura 3.1). Os ensaios foram realizados entre no Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI) do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em Natal/RN, nas proximidades do Laboratório de Mecânica dos Solos e do Programa de Educação Tutorial do curso de Engenharia Elétrica.

Uma das vantagens de se realizar simulações de chuva em vez de utilizar dados referentes aos eventos de chuvas reais é o controle sobre variáveis da chuva, como volume, duração e intensidade. Além disso, com as simulações, não houve dependência da ocorrência de eventos de chuvas naturais para que fosse necessária a aquisição de dados para a pesquisa.



Figura 3.1: Localização da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em Natal/RN.

Fonte: Google Maps (10/05/2017).

3.1 Localização da pesquisa

Os ensaios de simulação de chuva foram realizados entre no Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI) do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em Natal/RN, nas proximidades do Laboratório de Mecânica dos Solos e do Programa de Educação Tutorial do curso de Engenharia Elétrica.

Visando a reduzir o efeito do vento nas simulações e obter uma chuva mais homogênea, foi feita uma limpeza da área, retirando toda a vegetação presente, para isolamento (Figura 3.2.a). A proteção da área deu-se com a utilização de pilares e vigas de caibros de Maçaranduba, com seção transversal de 5 cm x 6 cm, nos quais foram fixados ganchos parafusados para a colocação de lonas nas laterais. As lonas, que possuíam 3 m de altura e 5 m de comprimento, foram previamente furadas em suas laterais com a colocação de anilhas para que fosse possível pendurá-las nos ganchos parafusados (Figura 3.2.b) e ancorá-las no solo, utilizando-se estacas para barracas. Na lateral próxima à parede, a lona foi ancorada também com ganchos parafusados à alvenaria, enquanto na lateral frontal a mesma foi amarrada ao caibro com arames, através das anilhas.

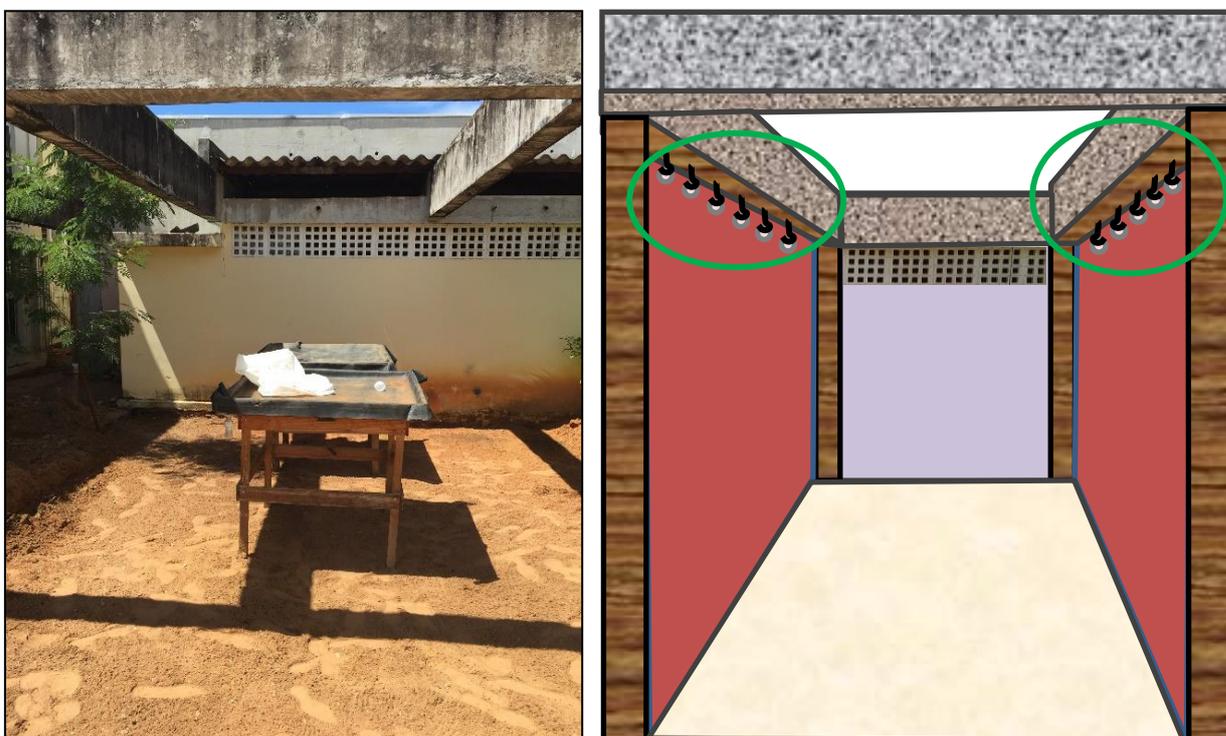


Figura 3.2: a) Local onde as simulações de chuva foram realizadas com terreno limpo e b) Imagem esquemática do isolamento do local, com a colocação dos caibros, ganchos parafusados e lonas.

3.2. Módulo

O módulo utilizado nesta pesquisa foi o mesmo módulo MVGT (Módulo Vegetado Geotêxtil) utilizado por Louzada (2016). A base do protótipo foi feita com tábuas de madeira de reflorestamento de 25,4 mm de espessura, com largura de 1,10 m e comprimento de 1,30 m, correspondendo a uma área de 1,43 m² (Figura 3.3).

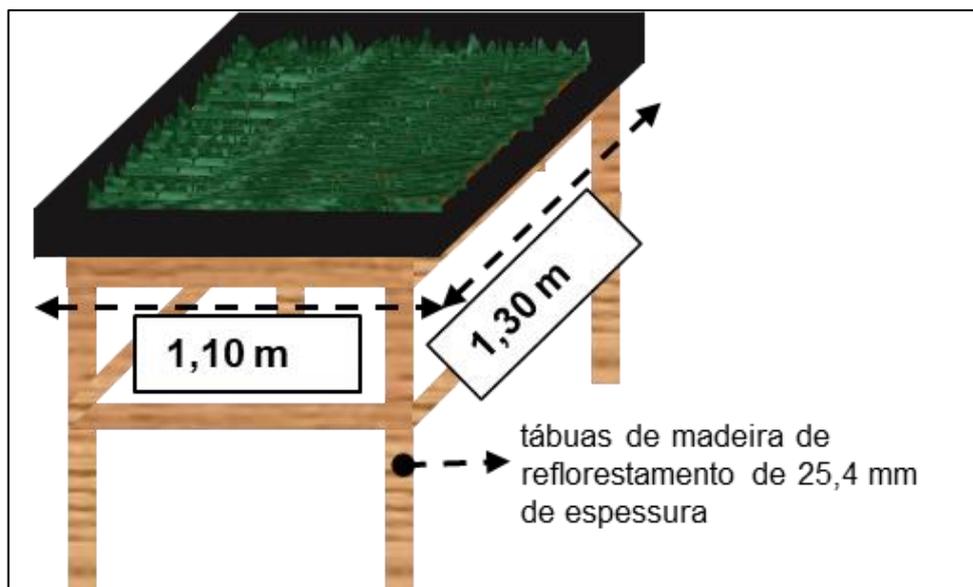


Figura 3.3: Imagem esquemática com dimensões do módulo de madeira.

A primeira camada montada sobre o módulo, responsável pela impermeabilização do módulo, foi feita com uma geomembrana EPDM. A membrana utilizada possuía 1,1 mm de espessura e densidade de $1,2 \text{ g/cm}^3$, sendo um material que não contribui com muito peso para o módulo. O material consiste em uma manta pré-fabricada de elastômero sintético de etileno-propileno-dieno-monômero, obtida através do processo de vulcanização, com excelentes características de elasticidade, impermeabilidade, alta resistência ao UV e ao ozônio, com desempenho diferenciado de durabilidade (cerca de 50 anos) e de características físico-químicas (Viapol Euclid Group). O sistema de drenagem foi feito utilizando-se uma válvula de drenagem usada em lavatórios (Figura 3.4). Além da função impermeabilizantes, a geomembrana também desempenhou a função de proteção e de barreira anti-raiz.



Figura 3.4: Geomembrana e válvula de drenagem instalada (Louzada, 2016).

Acima da geomembrana, foi disposta uma camada de geotêxtil não tecido, com a finalidade de filtrar o substrato, proteger a geomembrana, filtrar a água da chuva, impedir o carreamento do substrato e auxiliar na drenagem do escoamento. O geotêxtil utilizado foi feito em poliéster com gramatura de 200 g/m². Próximo à válvula de drenagem, uma faixa composta de brita do nº 1 com largura de 5 cm foi colocada entre o geotêxtil e a geomembrana para facilitar o caminho da água escoada (Figura 3.5).



Figura 3.5: Detalhe da faixa de brita entre o geotêxtil e a geomembrana.

Sobre o geotêxtil, uma camada de 4 cm de substrato foi empregada com o objetivo de nutrir a vegetação e reduzir o fluxo máximo do escoamento. O substrato utilizado foi uma areia barrada, material de baixo custo e fácil acesso comercial, comumente utilizado para cultivo de gramas. Uma fina camada de adubo foi depositada sobre a areia barrada para garantir a adequada nutrição da grama que foi colocada posteriormente. (Figura 3.6)



Figura 3.6: Disposição das camadas de areia barrada e do adubo.

Com o objetivo de conhecer melhor o solo, Louzada (2016) fez ensaios de caracterização da areia barrada. Os ensaios de limite de consistência apontaram que o solo não apresentava plasticidade. Utilizando o método do picnômetro, foi possível obter a massa específica dos sólidos do solo, que foi do valor de $2,61 \text{ g/cm}^3$. Ademais, ensaios de análise granulométrica também foram feitos Louzada (2016). A curva granulométrica obtida no ensaio mostrou que o solo apresenta percentuais de 3% e areia grossa, 33% de areia média, 3% de areia fina e aproximadamente 14% de finos (Figura 3.7). Apesar disso, os ensaios de limites de consistência realizados por Louzada (2016) mostraram que o solo não apresenta plasticidade. Com isso, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos, tem-se que o solo consiste em uma areia siltosa, representado pelas letras SM.

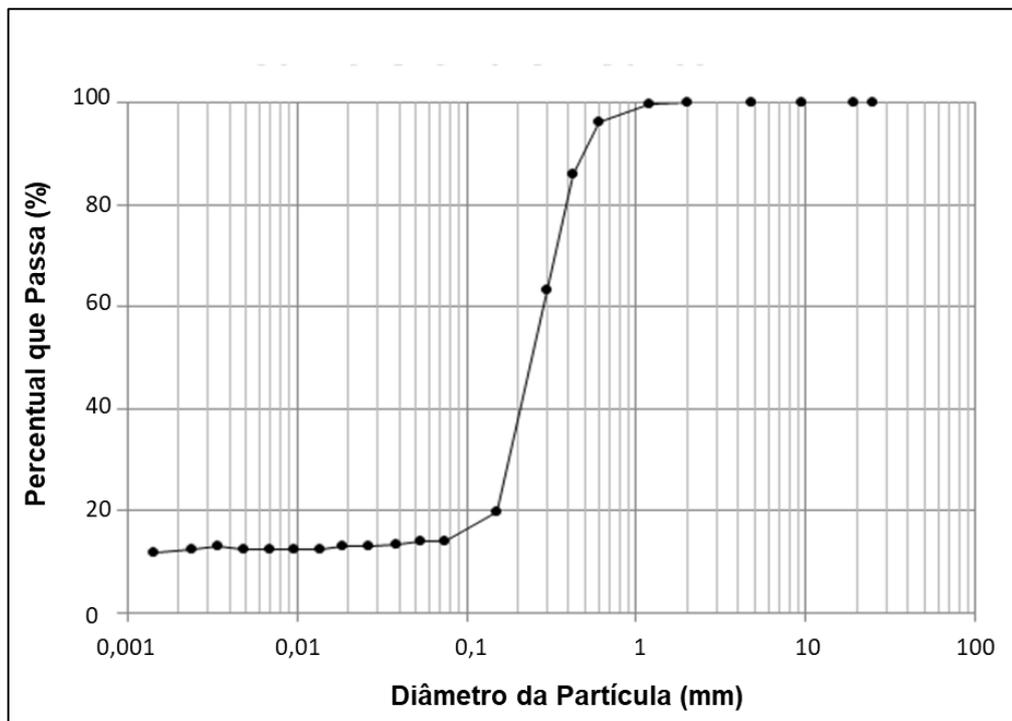


Figura 3.7: Curva de distribuição granulométrica da areia (Louzada, 2016).

A vegetação, última camada do módulo vegetado, foi constituída de grama esmeralda (de nome científico *Zoysia japônica*). De acordo com Godoy e Villas Boas (2008), são plantas que se adaptam a diferentes tipos de solo e se desenvolvem bem em áreas de plena insolação. Assim como o substrato escolhido, a grama esmeralda também é de baixo custo e fácil acesso comercial, podendo ser facilmente encontrada em estabelecimentos de jardinagem.

3.3. Simulador de chuvas

O simulador foi montado utilizando conexões de 20 mm, formando um losango de 1 m x 1 m (Figura 3.8). No meio de cada cano, foi realizado um furo para colocação de microaspersores modelo MA-50 fabricados pela AGROJET, que foram colocados nessas posições com o objetivo de simular uma chuva homogênea sobre o módulo. De acordo com Louzada (2016), os microaspersores possuem uma vazão que varia de 44 a 58 litros por hora. Um tê soldável foi colocado em um dos lados do simulado para que fosse possível colocar um cano com adaptador para a entrada da mangueira. O conjunto foi amarrado a ripas de madeira pinus com seção transversal de 30 mm x 12 mm, as quais foram apoiadas nas vigas de concreto laterais da estrutura do Núcleo de Tecnologia Industrial.

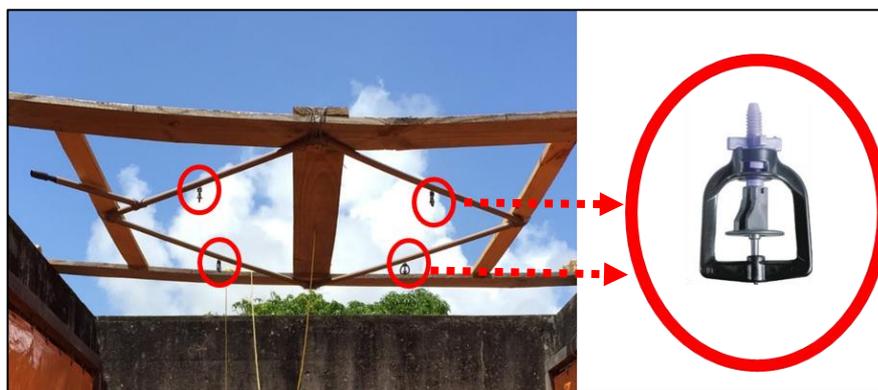


Figura 3.8: Simulador amarrado às ripas de madeira pinus. Detalhe do microaspersor à direita.

O sistema utilizado para abastecer o simulador de chuvas foi composto de um reservatório de água, uma bomba centrífuga, conexões de PVC e duas mangueiras. O reservatório utilizado para armazenamento de água foi uma caixa d'água Fortlev com capacidade de 250 litros. Por meio de conexões de PVC, a caixa era ligada até uma bomba hidráulica com potência de 0,5 cv. Entre a caixa d'água e a bomba havia um registro de esfera que controlava a passagem de água. Na saída da bomba, foi utilizada uma conexão hidráulica que permitisse duas saídas: uma para o simulador e outra que retornasse para a bomba, a qual poderia ter a vazão de água controlada com outro registro de esfera. Louzada (2016) justificou esse retorno afirmando que a configuração só com uma saída forçava o conjunto bomba (mangueiras e microaspersores). Em ambas as saídas, mangueiras de jardinagem com 32 mm de diâmetro foram conectadas para conduzir a água aos seus devidos destinos. A saída principal conduzia a água até o simulador, que ficava amarrado nas ripas e continha

os microaspersores, enquanto a outra saída conduzia a água de volta para o reservatório. A Figura 3.9 mostra um esquema com a ligação entre o reservatório, a bomba e o simulador.

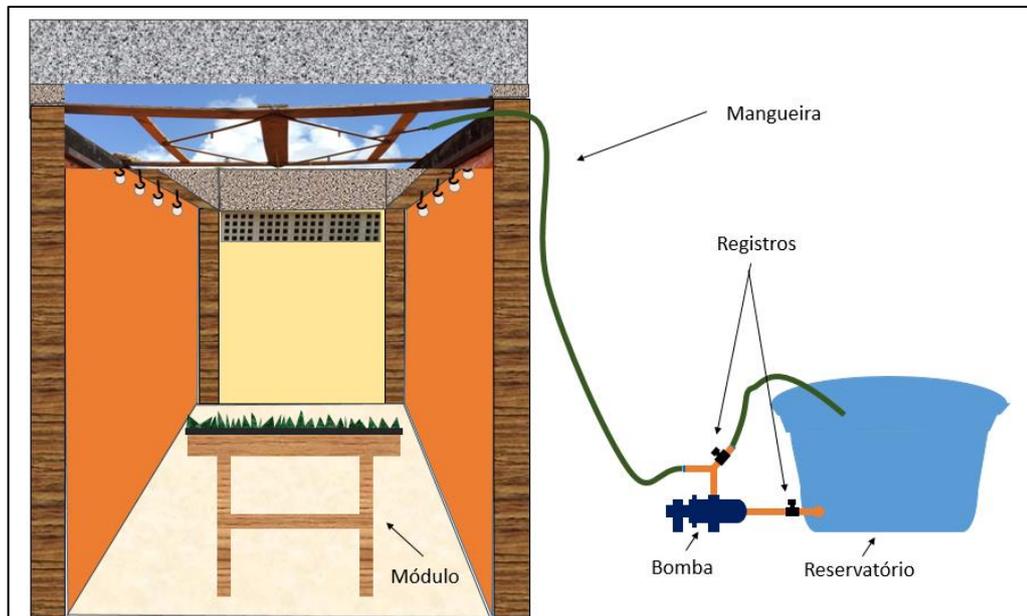


Figura 3.9: Imagem esquemática com os materiais utilizados para simular a chuva.

Antes e após as simulações de chuva, três amostras do substrato foram coletadas nas posições 1, 2 e 3 (Figura 3.10) para obtenção do teor umidade por secagem em estufa. Após pelo menos 24h de secagem, as amostras eram retiradas e pesadas para o cálculo do teor de umidade do substrato.

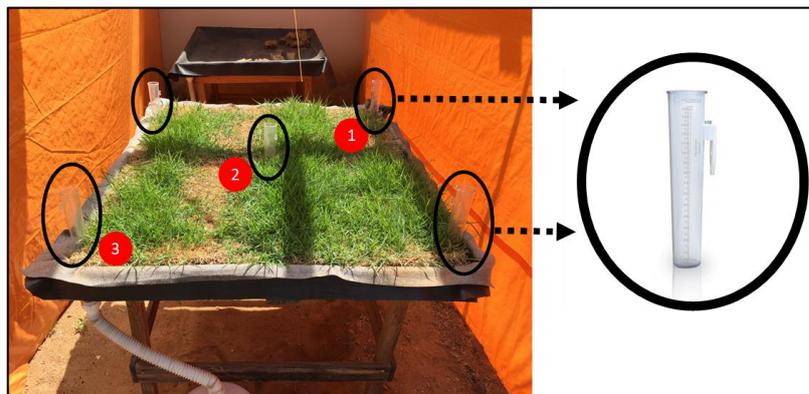


Figura 3.10: Localizações de onde as amostras do substrato eram coletadas para análise do teor de umidade e posicionamento dos pluviômetros. Detalhe do pluviômetro à direita.

Sobre os módulos, cinco pluviômetros foram posicionados para que fosse

possível a aquisição de dados referentes a intensidade e distribuição da chuva. Os pluviômetros foram colocados nas posições mostradas (Figura 3.10). O cálculo do volume da precipitação total do módulo foi obtido como a média da medida obtida nos pluviômetros multiplicada pela área do módulo (1,43 m²).

Abaixo do módulo, um tubo de captação conduzia a água escoada do módulo até um galão de água de 20 L. Uma balança com precisão de 20g ficava posicionada abaixo do módulo medindo a massa de água captada pelo galão. Nesse caso, como os pluviômetros medem a altura da lâmina de água gerada pela chuva numa área de 1m², tem-se que a ordem grandeza medida nas leituras dos pluviômetros (mm), correspondem à ordem de grandeza da massa de água (kg ou L) mostrada pela balança. Na tabela 3.1 a seguir, pode-se ver todos os itens utilizados no simulador.

Tabela 3.1 – Relação dos materiais utilizados no simulador de chuvas.

Qtd.	Und.	Peça
1	peça	Motobomba centrífuga 1/2 CV de potência, tubulação de sucção e recalque DN 32
1	peça	Pino macho
2	m	Fio flexível 2,5 mm
1	peça	Disjuntor 15 Ampéres
1	peça	Reservatório de plástico 250 L
3	peça	Adaptador 1"x32
1	peça	Flange DN 32
2	peça	União DN 32
1	peça	Registro de esfera DN 32
1	m	Tubo pvc água DN 32
1	peça	Joelho DN 32
1	peça	Tê DN 32
2	peça	Luva mista 1"x32
2	peça	Adaptador para mangueira DN 32
10	m	Mangueira DN 32 PVC trançada
4	peça	Abraçadeiras 1"
2	peça	União para mangueira 1"
4	peça	Joelho DN 20
1	peça	Tê DN 20
4,5	m	Tubo pvc água DN 20
4	peça	Microaspersores modelo CA 50 Injet
5	peça	Pluviômetros

Adicionalmente, um módulo instalado somente com a geomembrana funcionou como telhado controle serviu de referência para que se fosse feita uma calibração entre a precipitação medida pelos pluviômetros e o volume de água escoado. Nesse caso, considerou-se a geomembrana como material impermeável e que toda a água de chuva precipitada sobre o telhado fosse escoada.

Dessa forma, foi possível comparar os valores de precipitação medidos pelos pluviômetros e compará-los com o volume de água de chuva coletado pelo galão de 20 L. Logo, por meio da calibração, foi possível obter o volume de chuva precipitado no telhado verde e, com isso, a capacidade de retenção (CR) do telhado verde, que foi calculada como:

$$CR = 1 - \frac{\text{Volume de chuva escoado}}{\text{Volume de chuva precipitado}} \text{ (Equação 3.1)}$$

Além da capacidade de retenção, foi analisado também a vazão do escoamento. Com isso, foi possível analisar o comportamento do telhado verde quanto à sua capacidade de retenção e analisar o tempo de início e fim de escoamento da água provinda das simulações em função do teor de umidade do substrato e da intensidade e duração das chuvas. Nesse caso, o tempo de duração de chuva era medido por meio de um cronômetro e, a cada minuto, era feita uma leitura da massa de água coletada pelo galão de 20 L que ficava sob a balança. O tempo de início de escoamento era determinado a partir do momento que a balança registrava o acréscimo de 0,02 kg e o tempo de fim de escoamento era definido como aquele que, após 10 leituras seguidas, não havia alteração da leitura registrada.

3.4. Intensidade das chuvas

Estudos desenvolvidos pela Secretaria Municipal de Obras e Viação (SEMOV) em 2007, do Projeto Básico de Drenagem e Pavimentação do Bairro Capim Macio e Marina Praia Sul, em Natal, analisaram equações de chuvas para a cidade de Natal (Prefeitura Municipal de Natal, 2008). Com base nas equações de chuva desenvolvidas para Natal, os resultados mostraram as precipitações de chuvas intensas, em milímetros, para as durações e tempos de retorno dados na Figura 3.11:

A partir da equação ajustada por SEMOV, 2007														
Duração	min	min	min	hora	horas	dias	dias	dias						
	5	15	30	1	2	4	8	14	24	48	3	4	6	
Recorrência (anos)	2,33	7,7	12,6	17,2	23,5	32,1	43,8	59,8	76,8	97,9	133,6	160,2	182,3	218,7
	10	10,8	17,7	24,2	33,0	45,0	61,4	83,8	107,7	137,2	187,3	224,7	255,6	306,6
	25	12,8	20,9	28,5	38,9	53,1	72,5	98,9	127,2	162,0	221,1	265,2	301,7	361,9
	50	14,2	23,3	31,8	43,4	59,3	80,9	110,4	141,9	180,7	246,6	295,9	336,6	403,8

Figura 3.11: Precipitações de chuvas intensas para a cidade de Natal. SEMOV (2007), apud Prefeitura Municipal de Natal (2008).

A Prefeitura do Município de São Paulo (1999) sugere, para projeto de microdrenagem de uma área residencial, a utilização de chuvas com tempo de retorno de 2 anos (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Tempo de retorno de projeto de chuvas para diferentes ocupações da área. Adaptado de Prefeitura do Município de São Paulo (1999).

Tipo de Obra	Tipo de Ocupação da Área	T (Anos)
Microdrenagem	Residencial	2
	Comercial	5
	Áreas com edifícios de serviços ao público	5
	Aeroportos	2-5
	Áreas comerciais e artérias de tráfego	5-10
	Áreas comerciais e residenciais	50-100
	Áreas de importância específica	500

Considerando uma chuva com recorrência de 2,33 anos e 1h de duração dada pela Tabela 3.1, tem-se uma precipitação de 23,5mm, o que resulta numa intensidade de aproximadamente 0,4mm/min. Portanto, foram realizadas chuvas mais fracas, com tempos de retorno menores e, conseqüentemente, mais frequentes para as condições locais, e chuvas com intensidades próximas de 0,4mm/min, as quais correspondem a chuvas intensas o suficiente para superar a capacidade de drenagem de um condomínio residencial.

Logo, por questões de praticidade, foram realizadas chuvas de 10, 30 e 60 minutos para condições de períodos de estiagem de até 10 dias com o objetivo de se ter chuvas fracas até chuvas com volume suficiente para superar a capacidade de drenagem de uma ocupação residencial, de acordo com Prefeitura do Município de São Paulo (1999), com umidades diferentes para que se fosse possível analisar o efeito da umidade na capacidade de retenção do módulo.

Com isso, foram realizadas um total de 30 simulações de chuvas, nas quais foram analisados: teor de umidade antes da simulação, teor de umidade após a simulação, tempo de início de escoamento, tempo de fim de escoamento, volume precipitado, intensidade da chuva, volume de escoamento, vazão de pico de escoamento e percentual de retenção.

3.5. Calibração do simulador

Para garantir a eficácia do simulador, foram realizadas 11 simulações de com diferentes durações para comparar o valor medido nos cinco pluviômetros distribuídos no módulo com o valor escoado em situações em que se considerou 0% de retenção (Tabela 3.3). Essa consideração se baseou no fato de utilizar o módulo somente com a geomembrana, que é impermeável, posta sobre este e assumiu-se que toda a água que caísse sobre o módulo era escoada e coletada, através de um tubo de drenagem, por um garrafão de plástico de 20 L posicionado abaixo do módulo. Com isso, comparou-se a média das medidas dos cinco pluviômetros, multiplicou-se esse valor por 1,43 para considerar a área total do módulo e comparou-se o valor medido com o valor coletado pelo garrafão de 20 L.

No total, foram realizadas três simulações de chuva com 10 min de duração, uma com 24 min de duração, duas com 30 min de duração, quatro com 60 min de duração e uma com 100 min de duração (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Resultados das simulações para segunda calibração.

Ensaio	Duração (min)	P1 (mm)	P2 (mm)	P3 (mm)	P4 (mm)	P5 (mm)	Média (mm)	Módulo (L)	Coletado (L)
1	10	1,6	1,9	1,90	2,3	1,8	1,90	2,72	3,68
2	10	2,0	1,5	1,8	2,0	1,9	1,84	2,63	2,98
3	10	2,0	1,8	2,8	3,7	2,1	2,48	3,55	4,52
4	24	6,0	5,2	4,7	4,8	4,0	4,94	7,06	10,44
5	30	4,9	4,5	4,7	4,9	2,7	4,34	6,21	9,54
6	30	6,6	4,5	5,0	6,8	3,0	5,18	7,41	9,44
7	60	14,0	11,7	13,2	11,2	8,0	11,62	16,62	18,56
8	60	13,7	12,0	10,8	12,7	9,9	11,82	16,90	16,90
9	60	12,0	14,5	11,8	12,3	10,0	12,12	17,33	17,22
10	60	8,0	9,0	10,8	12,0	8,0	9,56	13,67	13,47
11	100	16,0	15,2	17,8	19,0	14,7	16,54	23,65	24,00

Com os resultados da calibração, foi possível perceber que para chuvas de até 30 min, o volume coletado era sempre superior do que o volume obtido a partir das leituras dos pluviômetros. Pode-se justificar a diferença entre as medições obtidas por diferentes fatores. Primeiramente, o microaspersor ficava pingando gotas de água sobre o módulo com uma alta frequência (cerca de 0,5 segundos). Considerando a duração da chuva, essas gotas não caíam sobre os pluviômetros, mas eram coletadas pelo garrafão. Outro fator que pode ter influenciado na diferença das leituras é a possibilidade de o microaspersor estar parcialmente ou totalmente obstruído. Somente se percebia que o microaspersor estava obstruído quando este não girava ou girava de forma muito lenta. Tal constatação foi observada diversas vezes durante os ensaios de simulação. Além disso, ocorriam rajadas de vento que balançavam podia desviar o direcionamento da chuva para e ainda balançar as lonas posicionadas nas laterais da estrutura de isolamento, as quais estavam molhadas e jorravam água sobre o módulo.

Por outro lado, para chuvas com durações superiores a 60 min o volume coletado tenta a se equiparar ao volume obtido a partir das leituras nos pluviômetros. Com dados obtidos, foi plotado um gráfico com os valores de volume medido nos pluviômetros no eixo das nas abscissas e o volume escoado no eixo das ordenadas (Figura 3.12).

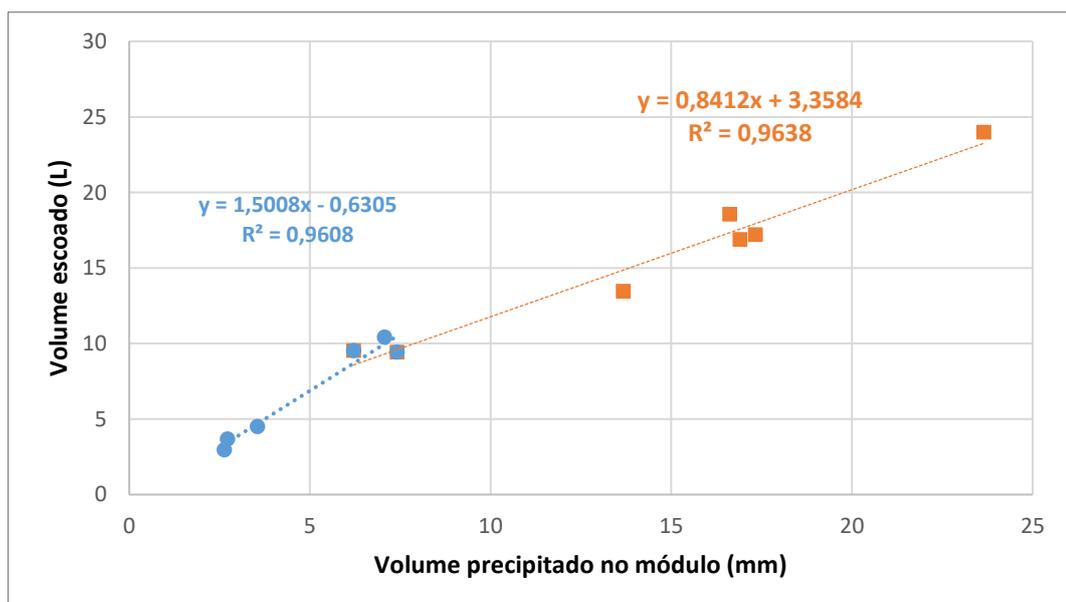


Figura 3.12: Calibração do simulador – comparação entre o volume medido nos pluviômetros e o volume escoado.

O gráfico mostrou que há uma função bilinear para o conjunto de dados analisado. No caso, há uma função determinada pela Equação 3.2 para os volumes medidos no pluviômetro com valores de 1,84 até 6,05 mm, ponto a partir do qual a função descreve a relação entre o volume medido nos pluviômetros (x) e o volume escoado (y).

$$y = 1,5008x - 0,6306 \text{ (Equação 3.2)}$$

$$y = 0,8412x + 3,3584 \text{ (Equação 3.3)}$$

Com isso, para os ensaios de simulação de chuva sobre o módulo vegetado, foi considerado que o volume total de chuva era determinado a partir da aplicação das duas equações citadas por meio da verificação do volume de chuva medido nos pluviômetros, aplicando-se a Equação 3.2 para volumes medidos menores de 6,05 e a Equação 3.3 para volumes medidos acima ou igual a 6,05. O resultado obtido a partir da inserção dos valores de entrada (volume medido dos pluviômetros, representados pela variável x) representa o volume da chuva simulada sobre o módulo (variável y).

3.6. Consideração do período de estiagem

Estudos realizados por Lee et al. (2013), Ferreira (2015) e Miranda (2016) analisaram a capacidade de retenção dos telhados verdes em função do período de estiagem. Neste presente estudo, pretende-se analisar o desempenho do telhado verde com períodos de estiagem de até 10 dias. Para tanto, houve dificuldade em analisar a capacidade de retenção para períodos acima de 5 dias, pois, por vezes, ocorreram eventos de chuvas naturais antes do período programado para se realizar a simulação de chuva, o que modificou o teor de umidade do substrato e eliminou a caracterização da condição de estiagem.

Para considerar o efeito do teor de umidade do substrato, foi feita uma análise de decaimento do teor de umidade do solo ao longo de 10 dias de estiagem. A análise foi feita a partir da irrigação do telhado verde (já com a grama esmeralda) com uma mangueira até que este apresentasse escoamento e mostrasse uma condição visual de encharcado. Com isso, foi considerado que o substrato estava saturado. Após a

saturação do substrato, foram coletadas amostras do mesmo nas posições 1, 2 e 3 do telhado verde (conforme mostrado anteriormente na Figura 3.10) em 1, 2, 3, 5, 7 e 10 dias seguintes. Assim que coletadas, as amostras eram levadas à estufa para obtenção do teor de umidade (Figura 3.13).

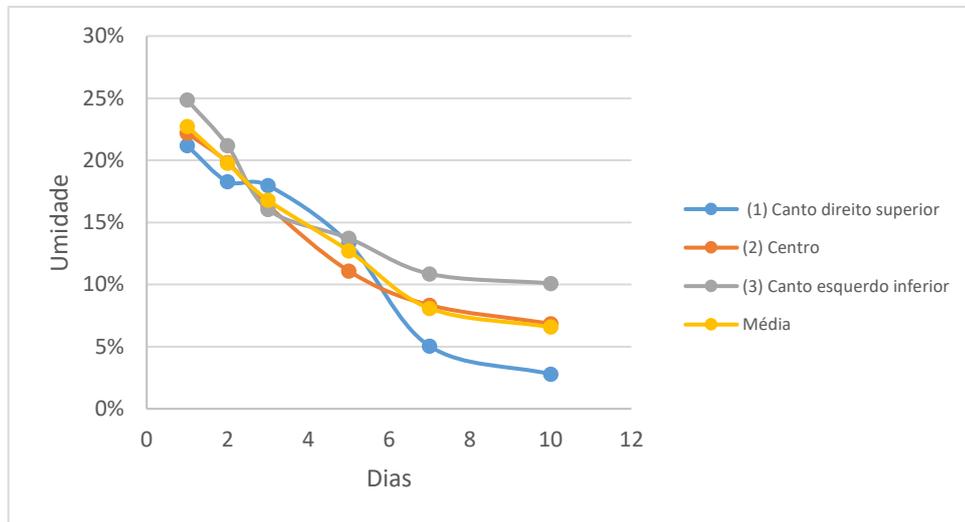


Figura 3.13: Gráfico da análise do decaimento do teor de umidade do substrato nos três pontos de coleta de amostras e a sua média ao longo de 10 dias sem chuva.

Desse modo, foi definido que a curva que representa o decaimento do teor de umidade do substrato equivale à média dos três valores medidos nas amostras coletadas nas posições 1, 2 e 3 ao longo dos 10 dias. Plotando os valores das médias no gráfico em função do período de estiagem das coletas, foi possível obter uma função (Equação 3.4) que relacionasse as duas variáveis (Figura 3.14)

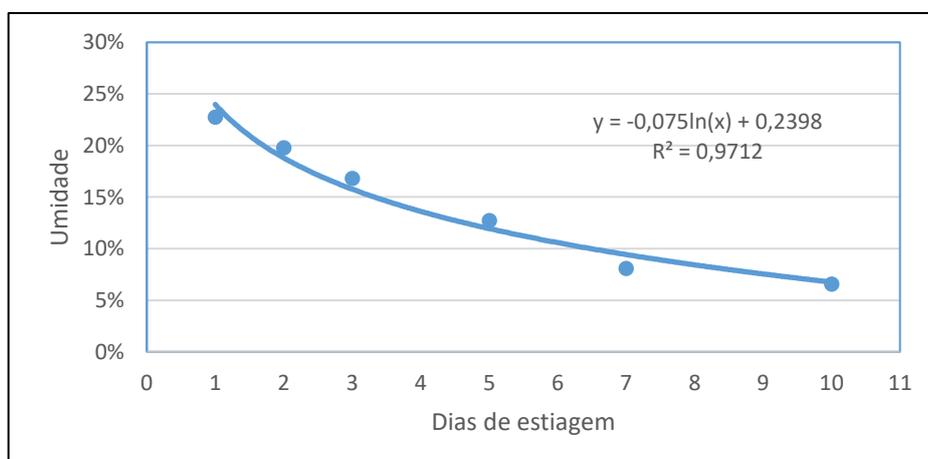


Figura 3.14: Curva de decaimento do teor de umidade médio do substrato em um período de estiagem de 10 dias.

$$y = -0,075 \times \ln(x) + 0,2398 \text{ (Equação 3.4)}$$

Assim, a partir da equação, foi possível estimar o período de estiagem equivalente do substrato em função do seu teor de umidade médio. Com isso, aplicando-se a Equação 3.4, onde y é o valor do teor de umidade do substrato e x é o período de estiagem em dias, tem-se:

Tabela 3.4 – Período de estiagem equivalente em função do teor de umidade.

Período de estiagem equivalente	Teor de umidade do substrato (%)
0	>23,98
1	23,98 a 18,78
2	18,77 a 15,74
3	15,73 a 13,58
4	13,57 a 11,91
5	11,90 a 10,54
6	10,53 a 9,39
7	9,38 a 8,38
8	8,37 a 7,50
9	7,49 a 6,71
10	≤6,70

Neste caso, a partir do teor de umidade obtido após secagem em estufa, foi analisado em qual intervalo de período de estiagem apresentava-se o substrato de acordo com a tabela 3.4, onde o período de estiagem equivalente foi definido como o menor valor do intervalo. Para chuvas simuladas logo após o término de outra chuva em que houve escoamento, foi definido o período de estiagem equivalente como 0 (zero), independentemente do teor de umidade do substrato.

3.7. Codificação das chuvas

Nesta pesquisa, foram realizadas um total de 30 simulações de chuvas. As chuvas foram classificadas e codificadas em função do período de estiagem equivalente, da duração da chuva e da intensidade da chuva. O período de intervalo entre as chuvas variou de zero, quando uma chuva era simulada após o fim de outra, a 10 dias. A duração das chuvas variou de 10 a 60 minutos e a intensidade variou de 0,06 a 0,42 mm/min. A codificação das chuvas foi feita apresentando-se o número do ensaio, o período de estiagem equivalente, a duração e a intensidade (e.g. Ensaio 06: 03d.30min.0,13mm/min. Dispensando-se 04 ensaios que apresentaram problemas

em sua execução, tem-se a codificação dos 10 ensaios de simulação de chuva na referentes ao primeiro simulador utilizado na Tabela 3.5, enquanto os outros 16 ensaios de simulação de chuva referentes ao segundo simulador utilizado se encontram na Tabela 3.6.

Tabela 3.5 – Codificação das chuvas utilizando o primeiro simulador.

Ensaio	Intervalo de dias entre simulações	Teor de umidade do substrato antecedente à chuva (%)	Período de estiagem equivalente (dias)	Duração (min)	Intensidade (mm/min)	Codificação
01	0	34,50	0	30	0,14	0d.30min.0,14mm/min
02	7	15,28	3	30	0,12	3d.30min.0,12mm/min
03	0	23,71	1	30	0,14	1d.30min.0,14mm/min
04	10	5,45	10	30	0,13	10d.30min.0,13mm/min
05	1	24,54	0	30	0,17	0d.30min.0,17mm/min
06	1	21,74	1	30	0,15	1d.30min.0,15mm/min
07	5	27,65	0	30	0,14	0d.30min.0,14mm/min
08	8	21,25	1	30	0,13	1d.30min.0,13mm/min
09	0	24,41	0	30	0,14	0d.30min.0,14mm/min
10	12	17,43	2	30	0,13	2d.30min.0,13mm/min

Tabela 3.6 – Codificação das chuvas utilizando o segundo simulador.

Ensaio	Intervalo de dias entre simulações	Teor de umidade do substrato antecedente à chuva (%)	Período de estiagem equivalente	Duração (min.)	Intensidade (mm/min)	Codificação
11	3	18,15	2	30	0,07	2d.30min.0,07mm/min
12	5	5,68	10	30	0,12	10d.30min.0,12mm/min
13	0	11,51	5	30	0,10	5d.30min.0,10mm/min
14	2	9,44	6	30	0,08	6d.30min.0,08mm/min
15	0	11,40	5	30	0,22	5d.30min.0,22mm/min
16	1	15,23	3	30	0,15	3d.30min.0,15mm/min
17	7	11,07	5	40	0,41	5d.40min.0,41mm/min
18	0	24,45	0	30	0,40	0d.30min.0,40mm/min
19	6	24,60	0	15	0,47	0d.15min.0,34mm/min
20	0	50,32	0	30	0,40	0d.30min.0,43mm/min
21	1	27,19	0	15	0,33	0d.15min.0,33mm/min
22	0	37,01	0	30	0,38	0d.30min.0,38mm/min
23	10	16,85	0	10	0,51	0d.10min.0,51mm/min
24	0	17,45	0	12	0,57	0d.12min.0,57mm/min
25	5	18,73	0	60	0,33	0d.60min.0,31mm/min
26	1	14,87	0	60	0,31	0d.60min.0,31mm/min

3.8. Análise de dados

Por meio dos dados obtidos nas simulações de chuvas, foi possível analisar:

- A capacidade de retenção do telhado verde em função do período de estiagem equivalente;
- A capacidade de retenção do telhado verde em função do volume de precipitação da chuva;
- A vazão de pico do escoamento e volume de escoamento acumulado do telhado controle e do telhado verde;
- A vazão de pico do escoamento do telhado verde e volume de escoamento acumulado em função do período de estiagem equivalente;
- O tempo de início e de fim de escoamento em função do período de estiagem equivalente e da duração e intensidade da chuva.
- O tempo de início e de fim de escoamento do telhado controle e do telhado verde;
- O volume de chuva necessário para que ocorra o escoamento em função da umidade antecedente à simulação da chuva;
- O teor de umidade final em função do teor de umidade inicial.

CAPÍTULO 4

Análise de Resultados

No Apêndices A, B e C se encontram todos os dados obtidos a partir das simulações de chuva executadas, como teores de umidade do substrato antes e depois da simulação da chuva; leituras obtidas nos cinco pluviômetros ao fim de cada chuva e volume acumulado de água escoada a cada minuto, obtido a partir da leitura de massa de água coletada no garrafão.

Nessa pesquisa, foram realizados ensaios de simulação de chuva com dois simuladores, sendo que primeiro simulador apresentou problemas de vazamento no dreno. Logo, os dados obtidos nessas simulações consideraram apenas os teores de umidade do substrato antes e após a simulação e o tempo de início e de fim de escoamento.

Para todas comparações feitas com os ensaios da calibração, considerou-se que o módulo empregado nos ensaios de simulação de chuva era impermeável e possuía 0% de capacidade de retenção. Logo, o módulo somente com a geomembrana utilizado nesses ensaios foi considerado o módulo controle.

4.1. Capacidade de retenção

A capacidade de retenção, principal parâmetro analisado nesta pesquisa, foi verificado para todos os ensaios realizados com o segundo simulador. Os fatores avaliados que podem influenciar na capacidade de retenção do telhado verde foram período de estiagem e duração e intensidade das chuvas. Inicialmente, pretendia-se também analisar a capacidade de retenção do protótipo em função da inclinação, mas o módulo apresentou sinais de desgaste que impediram a possibilidade de incliná-lo. Além disso, as dificuldades encontradas em esperar períodos de estiagem superiores a cinco dias fizeram com que fosse adotado o parâmetro de análise período de estiagem equivalente, mencionado no Capítulo 3. Neste caso, mediu-se o teor de umidade precedente à realização da simulação de chuva e determinou-se o seu período de estiagem equivalente de acordo com a Tabela 3.4.

Dessa forma, foram realizados ensaios de simulação de chuva de baixa intensidade em períodos de estiagem equivalente de até 10 dias. Com chuvas de intensidade entre 0,07 mm/min até 0,22 mm/min, a capacidade de retenção de água de chuva do telhado verde foi de 100% (Figura 4.1). Percebendo-se a necessidade de obtenção de valores de capacidade de retenção menores para uma melhor avaliação, diminuiu-se o período de estiagem entre os ensaios e regulou-se a válvula da bomba hidráulica para que fosse possível obter uma simulação de chuva com maior intensidade. Com isso, percebeu-se que os valores de capacidade de retenção de chuva variaram de 2,02 a 48,41% (Figura 4.1).

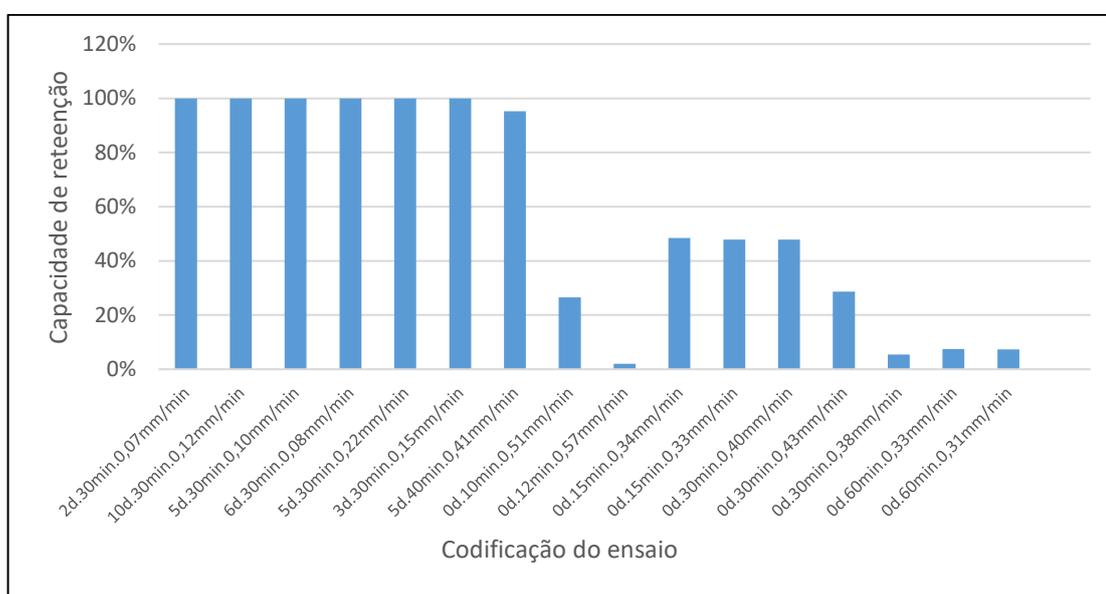


Figura 4.1: Capacidade de retenção dos ensaios utilizando o segundo simulador.

Logo, optou-se por analisar separadamente as chuvas com mesmo período de estiagem, verificando-se a influência do volume total de chuva precipitado (Figura 4.2).

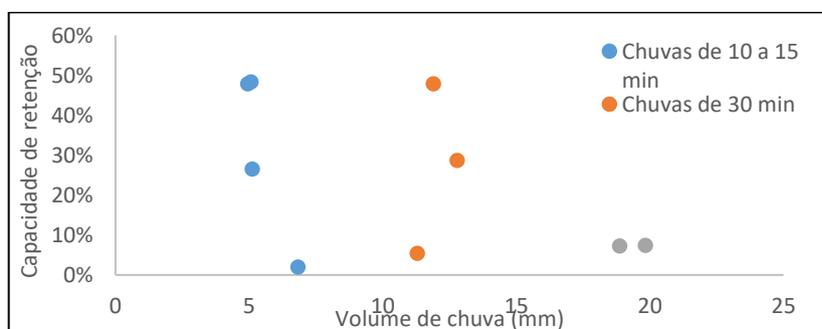


Figura 4.2: Capacidade de retenção dos ensaios com períodos de estiagem equivalente de 0 dias.

Diferentemente do que se esperava, os resultados não mostraram uma relação direta entre o volume da chuva e a capacidade de retenção. Analisando caso a caso,

percebeu-se que os valores de capacidade de retenção em ensaios de simulação de chuva subsequentes, que foram realizados nos mesmos dias, possuíam capacidade de retenção bem inferior em relação ao ensaio anterior (Tabela 4.1). Tal fato ocorreu nos dias 27/03/2018 (Ensaio 17 e 18), 02/04/2018 (Ensaio 19 e 20), 03/04/2018 (Ensaio 21 e 22) e 13/04/2018 (Ensaio 23 e 24). Com isso, percebe-se que os ensaios 17, 20, 21 e 23 mostraram valores de capacidade de retenção superiores aos ensaios subsequentes, que foram os ensaios 18, 20, 22 e 24.

Tabela 4.1 – Dados dos ensaios de simulação de chuva que apresentaram escoamento.

Ensaio	Codificação	Data	Umidade	Volume precipitado (mm)	Volume escoado (L)	Capacidade de retenção
17	5d.40min.0,41mm/min	27.03.18	11,07%	16,47	0,78	95,26%
18	0d.30min.0,40mm/min	27.03.18	24,45%	11,90	6,20	47,90%
19	0d.15min.0,34mm/min	02.04.18	24,60%	5,08	2,62	48,41%
20	0d.30min.0,43mm/min	02.04.18	50,32%	12,79	9,12	28,69%
21	0d.15min.0,33mm/min	03.04.18	27,19%	4,95	2,58	47,87%
22	0d.30min.0,38mm/min	03.04.18	37,01%	11,30	10,68	5,47%
23	0d.10min.0,51mm/min	13.04.18	26,38%	5,12	3,76	26,58%
24	0d.12min.0,57mm/min	13.04.18	32,56%	6,84	6,70	2,02%
25	0d.60min.0,33mm/min	18.04.18	27,67%	19,84	18,36	7,45%
26	0d.60min.0,31mm/min	19.04.18	28,44%	18,88	17,50	7,29%

Em cada um desses dias, o primeiro ensaio tinha como objetivo saturar o substrato para que se fosse possível analisar o desempenho do telhado verde nesta condição. Quando o escoamento iniciava, considerava-se que o substrato do módulo estava saturado e aguardava-se 5 minutos para desligar a bomba. Quando o escoamento cessava, eram feitas leituras dos pluviômetros e iniciava-se outro ensaio de simulação de chuva com o substrato saturado. Logo, apesar dos ensaios 19 ao 26 serem classificados com período de estiagem equivalente de 0 dias, percebe-se uma grande variação em seu teor de umidade, principalmente no segundo ensaio realizado em um mesmo dia. Nos ensaios 19, 21 e 23, que foram os primeiros ensaios do dia, percebe-se que o teor de umidade variou de 24,60% a 27,19%. Porém, nos ensaios 20, 22 e 24, que foram subsequentes aos ensaios 19, 21 e 23, nota-se que o teor de umidade variou de 32,56% a 50,32%. Isso se deve ao fato do substrato já apresentar água acumulada do ensaio anteriores. Em alguns casos, já havia se formado inclusive pequenas poças de água nos pontos onde a coleta era feita.

Nos dias 27/03/2018, 02/04/2018 e 03/04/2018, as chuvas subsequentes tiveram durações de 30 minutos com intensidades próximas de 0,40 mm/min e mostraram capacidades de retenção de 47,90%, 28,69% e 5,47%. É importante ressaltar que a capacidade de retenção da chuva era menor para os valores de umidade das chuvas precedentes às segundas chuvas. Da mesma forma, as primeiras chuvas dos dias 27/03/2018, 02/04/2018 e 03/04/2018 apresentaram valores de capacidade de retenção de 95,26%, 48,41% e 47,87%, respectivamente. Neste caso, a chuva com maior capacidade de retenção, de 95,26% no dia 27/03/2018, foi referente à condição em que o substrato estava mais seco, com umidade de 11,07%, ao passo que nos outros dois dias as primeiras chuvas apresentaram capacidades de retenção similares (48,41% e 47,87%) para condições de umidade do substrato próximas (24,60% e 27,19%). Com isso, é reforçada a ideia de que mesmo após 10 minutos do fim do escoamento, deve-se ainda haver água “em excesso” acumulada no telhado verde, o que pode ter interferido na baixa capacidade de retenção da chuva subsequente.

Nas chuvas do dia 13/04/2018, optou-se por regular a válvula da bomba hidráulica para elevar a intensidade da chuva. Nesse caso, o ensaio também tinha como objetivo saturar o substrato e teve a bomba desligada 5 minutos após o início do escoamento. Assim como as primeiras chuvas dos dias 02/04/2018 e 03/04/2018, que também tinham o substrato com teor de umidade próximos aos 25%, os volumes de chuva precipitados no módulo também foram próximos, ficando em torno de 5 mm. Apesar disso, a capacidade de retenção da chuva antecedente do dia 13/04/2018 foi de 26,58%, inferiores às primeiras chuvas dos dias 02/04/2018 e 03/04/2018, que foram feitas em condições de teor de umidade do substrato similares. Inicialmente, a segunda chuva simulada no dia 13/04/2018 foi planejada para durar 60 minutos, mas com 12 minutos de chuva a bomba hidráulica parou de funcionar. Logo, considerou-se apenas o período em que a bomba funcionou. Esta segunda chuva foi a que representou a menor capacidade de retenção de chuva, com valor de 2,02%, entre todos os ensaios de simulação de chuva realizados. Nota-se também que o valor da capacidade de retenção da chuva antecedente a esta foi a que apresentou menor magnitude, com valor de 26,58%, dentre todas as chuvas realizadas com o objetivo de saturar o substrato. Logo, reforça-se a ideia de que mesmo após o fim do

escoamento utilizando-se o critério de 10 minutos sem acréscimo de água coletada pelo garrafão, ainda haja água acumulada “em excesso” no substrato.

Por último, as chuvas dos dias 18/04/2018 e do dia 19/04/2018 foram únicas em seus dias e foram feitas com durações de 60 minutos. Em ambos os casos, todos os valores analisados foram próximos. As capacidades de retenção obtidas foram de 7,45% e 7,29% para chuvas com volumes de chuva 19,84 mm e 18,88 mm em condições em que o teor de umidade do substrato encontravam-se em 27,67% e 28,44% nas chuvas dos dias 18/04/2018 e 19/04/2018, respectivamente.

4.2. Vazão de pico do escoamento e volume de escoamento acumulado

Para todos os ensaios escoamento, incluindo-se os ensaios da calibração, onde o módulo utilizado foi considerado como telhado controle, foram analisadas as curvas de hidrogramas e os volumes de escoamento acumulados (Figura 4.3 a Figura 4.9). Através das curvas de hidrograma e as curvas de volumes de escoamento acumulados, foi possível obter o valor de pico de vazão do escoamento e analisar o decaimento da vazão após o término do ensaio. Além disso, por meio das curvas de hidrograma, também foi possível analisar a repetibilidade e aplicabilidade do ensaio de simulação de chuva utilizado.

4.2.1 Ensaios no telhado controle

Considerando os ensaios de calibração de 10 minutos (Figura 4.3 e Figura 4.4), percebeu-se que para o maior o volume de escoamento acumulado foi obtido maior o valor de pico de escoamento. A calibração 10min.2 acabou durando alguns segundos a mais, mas ainda assim foi a simulação de chuva que apresentou chuva com maior intensidade entre as três. A média de volume escoado das três chuvas foi de 3,73 litros e uma variação de $\pm 0,79$ litros.

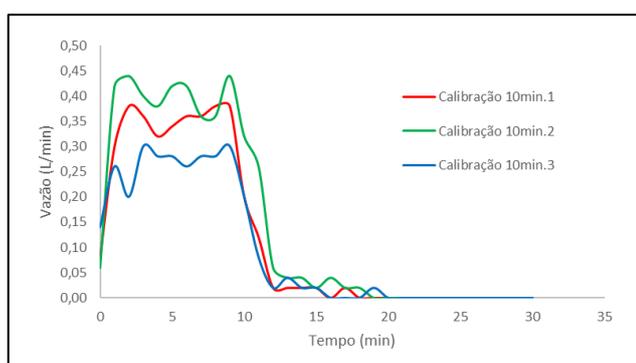


Figura 4.3: Vazão ao longo do tempo para simulações no módulo controle com duração de 10 min.

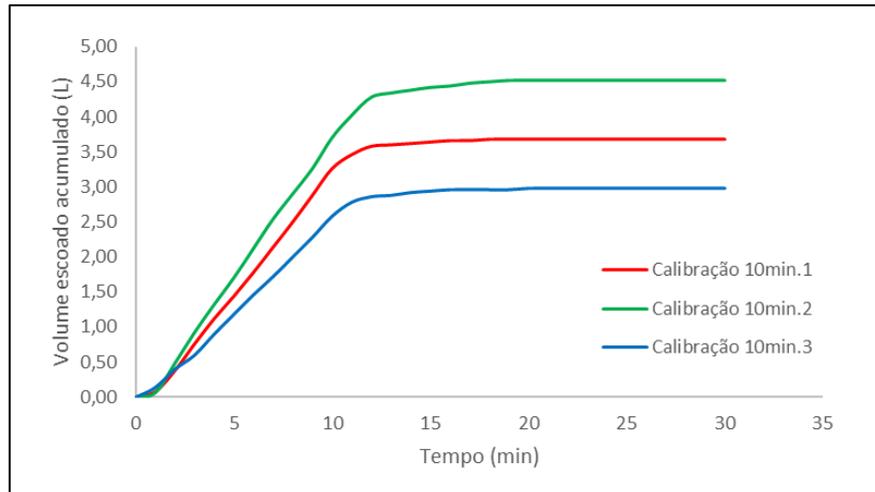


Figura 4.4: Volume de escoamento acumulado ao longo do tempo para simulações no módulo controle com duração de 10 min.

Para os ensaios de calibração de 24 e 30 minutos (Figura 4.5 e Figura 4.6), o parâmetro analisado para comparação com o valor de pico de escoamento foi a intensidade da chuva devido a diferença de duração de chuvas. Logo a chuva da calibração 24.1 apresentou intensidade de 0,44 mm/min, enquanto a chuva da calibração 30.1 e da calibração 30.2 apresentaram intensidades de 0,32 mm/min e 0,31 mm/min, respectivamente. Para esta comparação, a vazão de pico de maior valor (0,44 L/min) foi referente à chuva de maior intensidade (0,44 mm/min), enquanto que ambas as chuvas de 30 minutos apresentaram vazão de pico de 0,38 L/min. Comparando-se os valores de volume de escoamento acumulado das chuvas de 30 minutos, tem-se uma média de 9,81 litros com uma variação de $\pm 0,05$ litros.

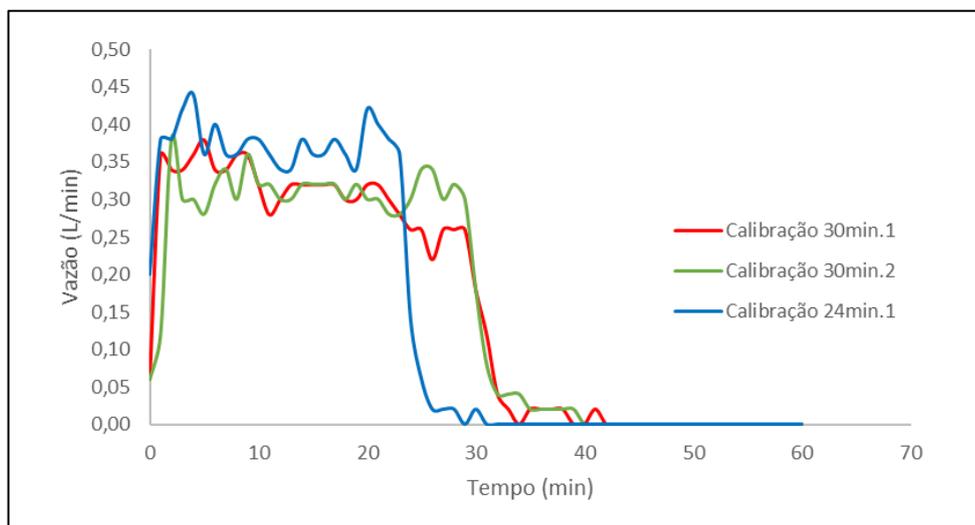


Figura 4.5: Vazão ao longo do tempo para simulações no módulo controle com durações de 24 e 30 minutos.

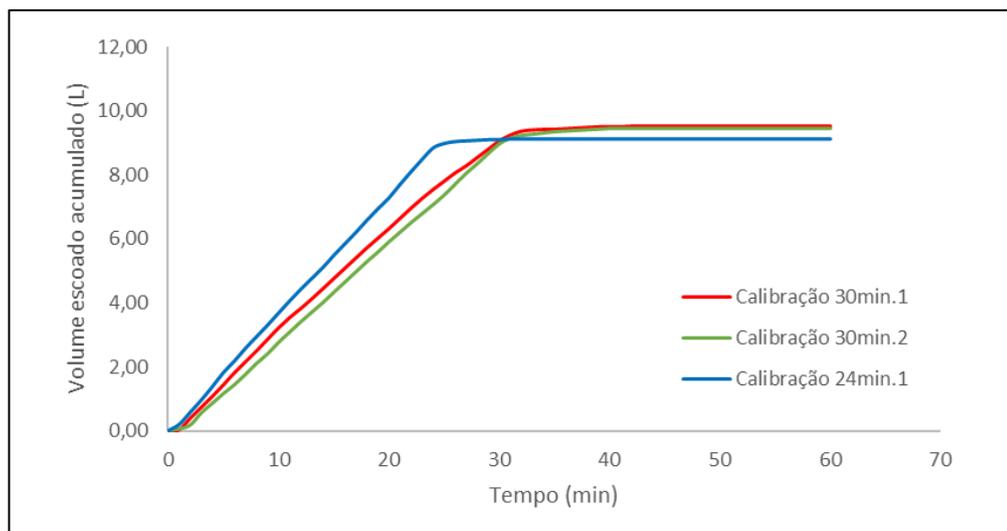


Figura 4.6: Volume de escoamento acumulado ao longo do tempo para simulações no módulo controle com durações de 24 e 30 minutos.

Com relação aos ensaios de calibração de 60 minutos (Figura 4.7 e Figura 4.8), a simulação que apresentou maior valor de vazão de pico, de 0,40 L/min, foi a calibração 60min.1, a qual também apresentou maior volume de escoamento acumulado e, conseqüente, maior intensidade. Enquanto isso, as calibrações 60min.2 e 60min.3 apresentaram mesmo valor de vazão de pico, de 0,34 L/min, e volumes de escoamento acumulado bem próximos. Comparando-se os valores de volume de escoamento acumulado nas três ocasiões, tem-se uma média de 17,56 litros com uma variação de $\pm 1,00$ litro.

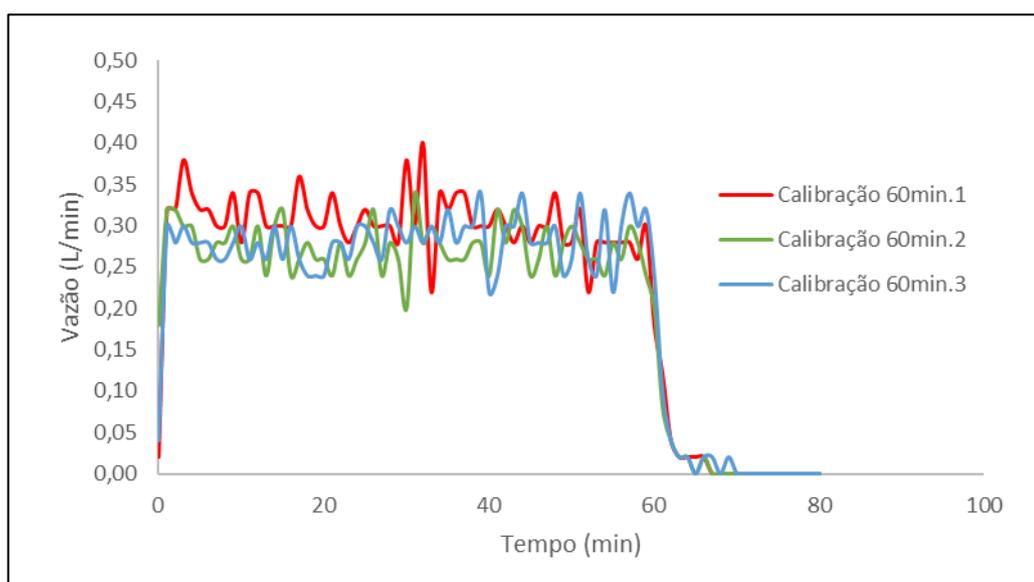


Figura 4.7: Vazão ao longo do tempo para simulações no módulo controle com duração de 60 min.

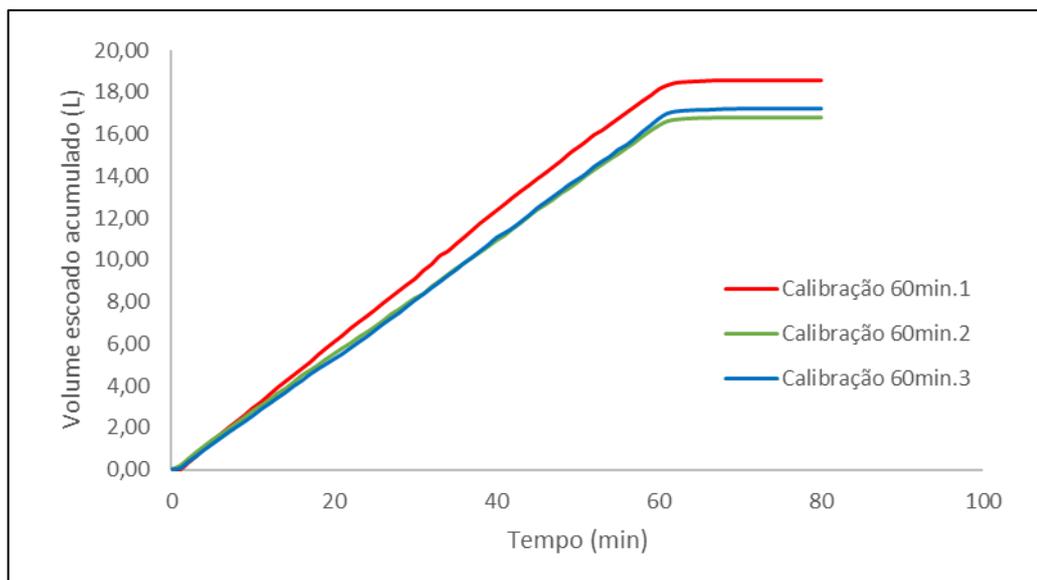


Figura 4.8: Volume de escoamento acumulado ao longo do tempo para simulações no módulo controle com durações de 60 min.

Considerando os ensaios analisados neste item, tem-se uma repetibilidade dos ensaios, visto que para todas as chuvas de mesma duração que foram aqui comparadas possuíram uma variação de no máximo 1 litro. Ademais, todos os valores de pico de escoamento foram maiores para valores de intensidade ou volume de escoamento acumulado também maiores.

4.2.2 Ensaios com o objetivo de saturar o substrato

Neste item, os ensaios foram realizados com diferentes durações, pois o objetivo destes era de se deixar o substrato na condição saturada para, após atingir essa condição, realizar chuvas de mesma duração e, dessa forma reproduzir ensaios em condições similares. Sendo assim, a simulação de chuva durava até 5 minutos após observado o início do escoamento e as leituras foram feitas até 10 minutos após observado o fim do escoamento.

Estes ensaios se referem aos primeiros ensaios entre duas simulações que ocorreram em um mesmo dia, conforme descrito no item 4.1. Utilizando a Figura 4.9, percebe-se que o ensaio com maior pico de vazão entre aqueles com períodos de estiagem equivalente de 0 dias foi o ensaio 23, onde a intensidade foi de valor mais elevado (0,51 mm/min), enquanto que os outros dois ensaios com períodos de estiagem equivalente de 0 dias (ensaios 21 e 19) apresentaram vazões de pico próximas, com valores de 0,20 L/min e 0,22 L/min, e intensidades próximas, com

valores de 0,33 mm/min e 0,34 mm/min, respectivamente. Ademais, o ensaio 23, que apresentou maior valor de vazão de pico foi o que reteve menos água (26,58%) em comparação ao ensaio 21 (47,78%) e ao ensaio 19 (48,41%). Fora o ensaio 23, que teve intensidade de 0,51 mm/min, valor superior ao das intensidades utilizadas na calibração, todos os outros ensaios da Figura 4.9 apresentaram vazões de pico de escoamento inferiores às vazões de pico de escoamento dos ensaios de simulação realizados no módulo controle. Por outro lado, o ensaio 17, apesar de ter valores de intensidade superiores aos outros ensaios analisados neste item, foi o que apresentou menor valor de pico de vazão (0,08 L/min). Tendo em vista que o substrato estava mais seco (com período de estiagem equivalente de 5 dias), foi verificado um maior tempo de início de escoamento. Apesar disso, este foi o ensaio com maior capacidade de retenção (95,26%) e menor volume de escoamento acumulado, de 0,78 litros (Figura 4.10).

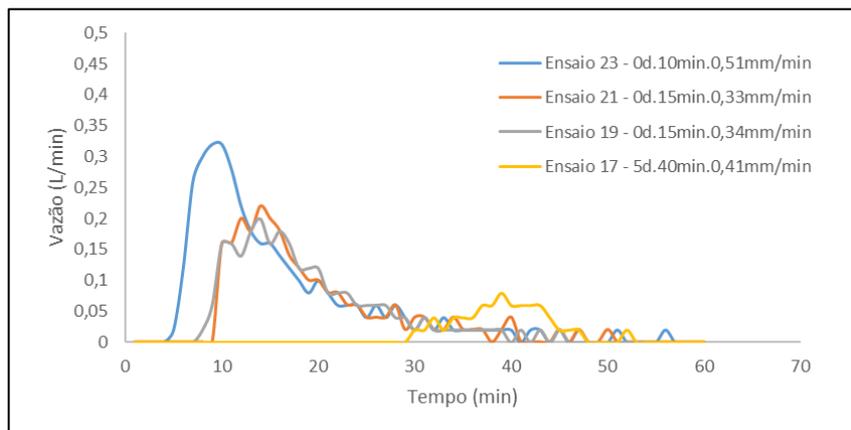


Figura 4.9: Vazão ao longo do tempo para chuvas de 10, 15 e 40 minutos, simuladas com o objetivo de saturar o substrato.

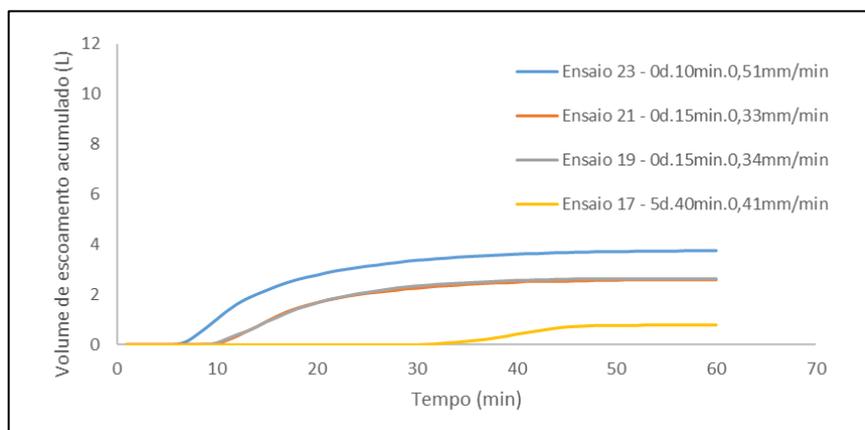


Figura 4.10: Volume de escoamento acumulado ao longo do tempo para chuvas de 10, 15 e 40 minutos, simuladas com o objetivo de saturar o substrato.

4.2.3 Ensaio com o substrato na condição saturada

Para os ensaios de simulação de chuva com duração de 30 minutos (Figura 4.11 e Figura 4.12), percebeu-se que os maiores valores de escoamento acumulado, foram obtidos os maiores valores de pico de escoamento. Apesar disso, nas três simulações de 30 minutos, não foi possível identificar uma relação direta entre a intensidade das chuvas (0,40, 0,43 e 0,38 mm/min) e o volume de pico de vazão (0,30, 0,32 e 0,36 L/min) para os ensaios 18, 20 e 22. Tal fato pode ser explicado em função da capacidade de retenção. O ensaio 22, apesar de ser o ensaio com menor valor de intensidade de chuva (0,38 mm/min), foi o que apresentou menor capacidade de retenção (5,47%) em relação ao ensaio 18 (47,90%) e ao ensaio 20 (28,69%).

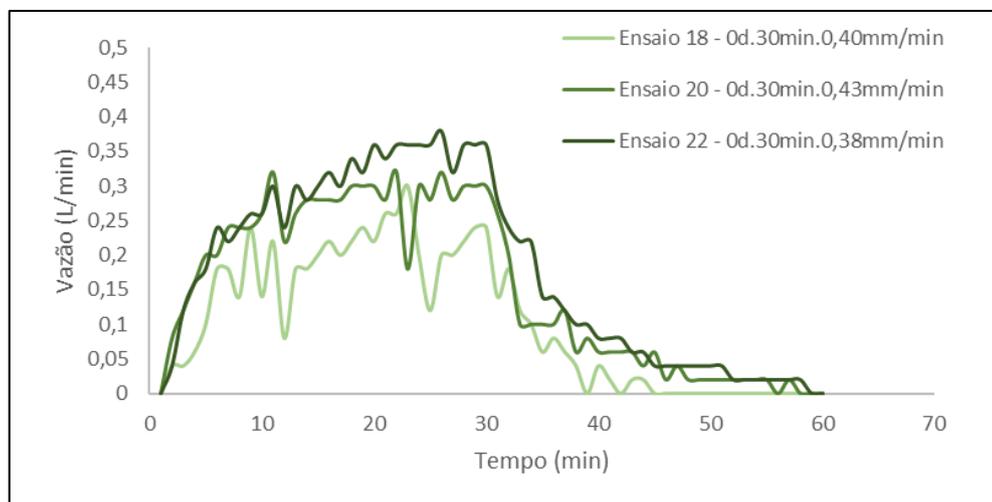


Figura 4.11: Vazão ao longo do tempo para chuvas de 30 minutos, simulada após o substrato encontrar-se saturado.

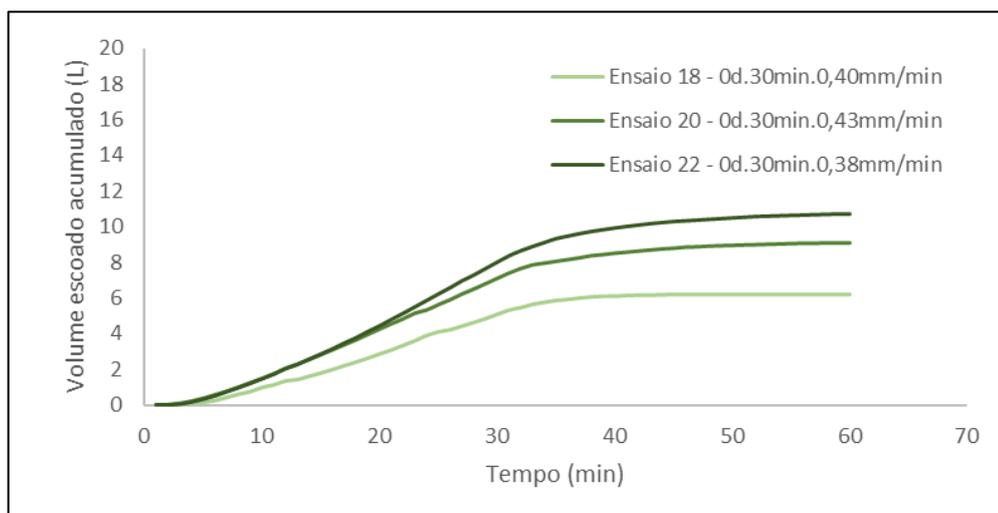


Figura 4.12: Volume de escoamento acumulado ao longo do tempo para chuvas de 30 minutos, simulada após o substrato encontrar-se saturado.

O ensaio 24 (Figura 4.13 e Figura 4.14), que era previsto para ter chuva com duração de 60 minutos, mas que durou apenas 12 minutos, foi o ensaio que apresentou maior intensidade (0,57 mm/min), maior vazão de pico (0,46 L/min) e menor capacidade de retenção (2,02%) entre todos os ensaios de simulação de chuva realizados. A elevada intensidade da precipitação demonstra o provável motivo da bomba ter parado de funcionar, demonstrando que essa era a capacidade máxima do sistema. O valor da vazão de pico superior a todos os ensaios demonstra que a redução deste parâmetro para os telhados verdes depende da intensidade da chuva, da condição de saturação do substrato e da baixa capacidade de retenção.

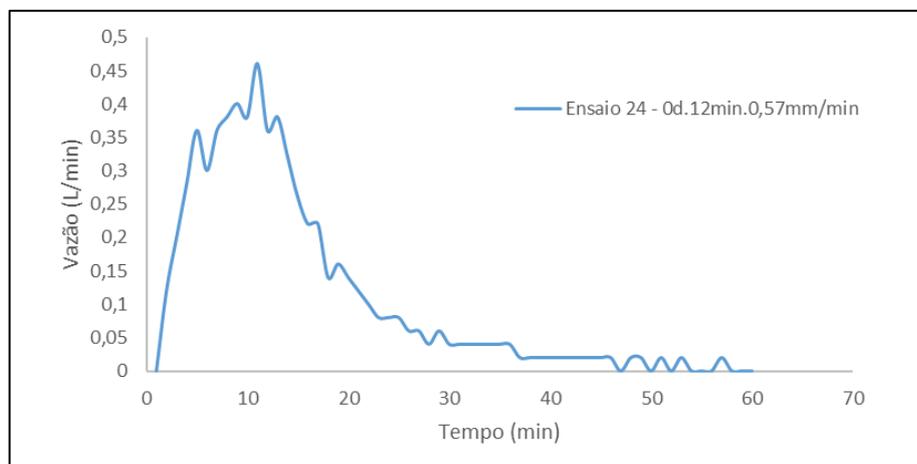


Figura 4.13: Vazão ao longo do tempo para chuva de 12 minutos, simulada após o substrato encontrar-se saturado.

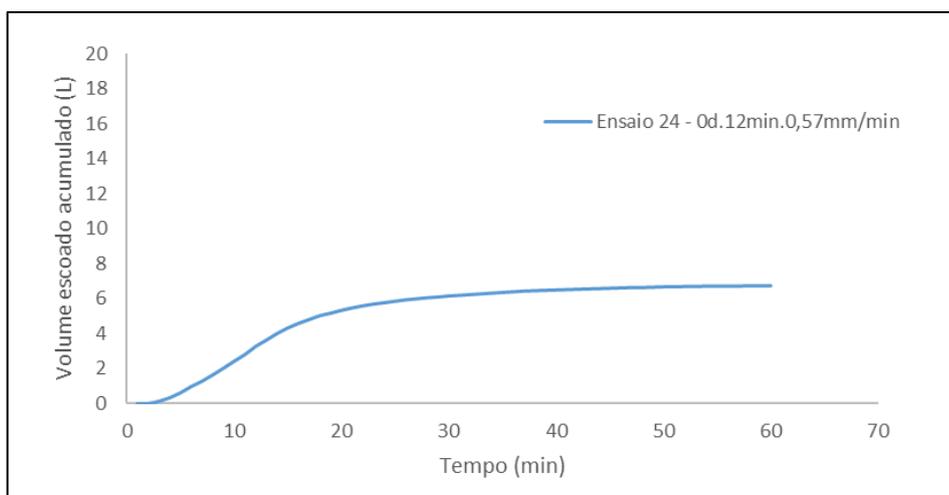


Figura 4.14: Volume de escoamento acumulado longo do tempo para chuva de 12 minutos, simulada após o substrato encontrar-se saturado.

Os ensaios 25 e 26 foram os que tiveram chuvas simuladas com maiores durações. Como o aspecto do substrato já apresentava uma condição úmida, não foi necessária uma chuva precedente para que o levasse à condição saturada. Ambos ensaios mostraram valores próximo de vazão de pico de escoamento, intensidade da chuva e volume de escoamento acumulado (Figura 4.15 e Figura 4.16).

Conseqüentemente, os valores da capacidade de retenção também foram próximos. O formato equivalente das duas curvas mostra que o ensaio de simulação de chuva possui uma boa repetibilidade. Mais uma vez, os valores de vazão de pico de escoamento não se mostraram menores do que os valores de vazão de pico apresentados nos ensaios de calibração. Os valores de vazão de pico de escoamento do ensaio 25 (0,38 L/min) e do ensaio 26 (0,40 L/min), que tiveram intensidades de chuva de 0,33 mm/min e 0,31 mm/min se equiparam aos valores de vazão de pico de escoamento realizados no módulo controle com valores de intensidade similares.

Os ensaios de calibração 30min.1, 30min.2 e 60min.1 realizados com intensidades de chuva de 0,32 mm/min, 0,31 mm/min e 0,31 mm/min apresentaram valores de vazão de pico de 0,38 L/min, 0,38 L/min e 0,40 L/min, o que reforça a ideia de que a redução de vazão de pico em telhados verdes só é válida para chuvas em condições em que o solo não esteja saturado, ocasiões às quais os telhados verdes tendem a apresentar valores de capacidade de retenção mais altos.

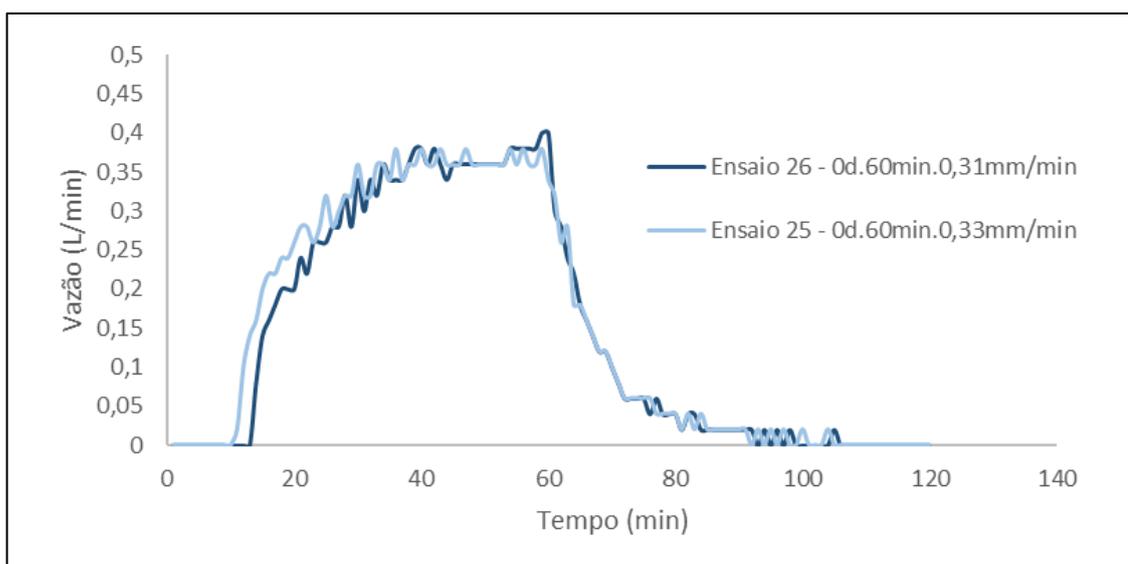


Figura 4.15: Vazão ao longo do tempo para chuvas de 30 minutos, simulada após o substrato encontrar-se saturado.

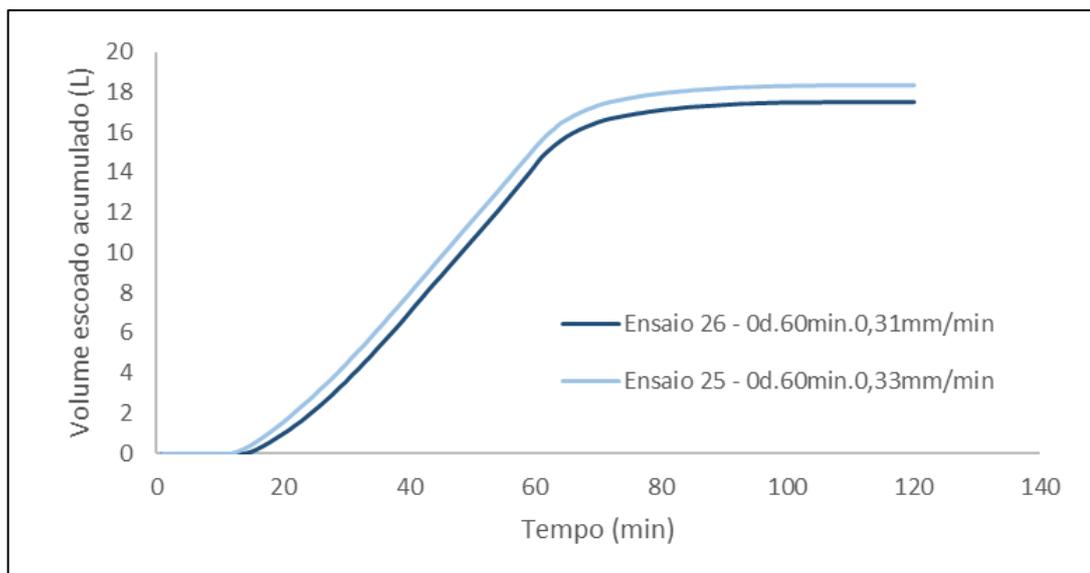


Figura 4.16: Volume de escoamento acumulado ao longo do tempo para chuvas de 30 minutos, simulada após o substrato encontrar-se saturado.

4.3. O tempo de início e de fim de escoamento

Para analisar o efeito do telhado verde no escoamento, além dos hidrogramas, foi feita uma análise do retardo no escoamento da água de chuva que o telhado verde pode proporcionar a uma edificação. Para isso, comparou-se os tempos de início e de fim de escoamento da água de chuva no módulo vegetado com os tempos de início e de fim de escoamento da água de chuva no telhado controle.

Para isso, foi determinado que o tempo de início de escoamento se dava quando a balança contava o primeiro acréscimo de 20 gramas de massa de água, enquanto o tempo de fim de escoamento se dava quando se tinha 10 minutos seguidos sem acréscimo de 20 gramas de massa de água. Os resultados do início e fim de escoamento de cada ensaio que proporcionou esta análise (aqueles em que houve escoamento) podem ser visualizados na Tabela 4.2.

No módulo controle, o escoamento sempre se iniciava 1 minuto após o início da chuva e se terminava entre 7 e 12 minutos após o desligamento da bomba hidráulica. Por outro lado, o tempo de início de escoamento do módulo vegetado variou entre 2 e 31 minutos, enquanto o fim do escoamento variou entre 8 e 47 minutos. Essa escala maior de variação no tempo de início de escoamento se deu em função da umidade do substrato. Quanto mais seco o substrato, mais se demorou para iniciar o escoamento.

Tabela 4.2 – Tempo de início e de fim de escoamento das simulações de chuva.

Ensaio	Chuva		Escoamento	
	Duração (mm)	Intensidade (mm/min)	Início (min)	Fim (min)
Calibração 10.1	10	0,37	1	18
Calibração 10.2	10	0,3	1	19
Calibração 10.3	10	0,41	1	21
Ensaio 23 - 0d.10min.0,51mm/min	10	0,51	7	57
Ensaio 24 - 0d.12min.0,57mm/min	12	0,57	3	58
Ensaio 19 - 0d.15min.0,34mm/min	15	0,34	9	46
Ensaio 21 - 0d.15min.0,33mm/min	15	0,33	11	51
Calibração 24.1	24	0,24	1	31
Calibração 30.1	30	0,32	1	42
Calibração 30.2	30	0,31	1	40
Ensaio 01 - 0d.30min.0,14mm/min	30	0,14	3	57
Ensaio 05 - 0d.30min.0,17mm/min	30	0,17	28	44
Ensaio 08 - 1d.30min.0,13mm/min	30	0,13	21	58
Ensaio 09 - 0d.30min.0,14mm/min	30	0,14	3	54
Ensaio 18 - 0d.30min.0,40mm/min	30	0,40	3	45
Ensaio 20 - 0d.30min.0,43mm/min	30	0,43	2	58
Ensaio 22 - 0d.30min.0,38mm/min	30	0,38	3	59
Ensaio 17 - 5d.40min.0,41mm/min	40	0,41	31	48
Calibração 60.1	60	0,29	1	67
Calibração 60.2	60	0,22	1	67
Calibração 60.3	60	0,24	1	70
Ensaio 25 - 2d.60min.0,33mm/min	60	0,33	13	105
Ensaio 26 - 3d.60min.0,31mm/min	60	0,31	15	106

No ensaio Ensaio 17 - 5d.40min.0,41 mm/min, por exemplo, o solo estava seco, numa condição de período de estiagem equivalente de 5 dias, e demorou 31 minutos para se iniciar o escoamento em uma chuva com intensidade de 0,41 mm/min, enquanto em um ensaio com o solo úmido, com período de estiagem equivalente de 0 dias, o início de escoamento ocorreu, em média, 3 minutos após iniciar o ensaio.

De outra forma, o tempo de fim de escoamento dependia do volume de água acumulado no substrato após este atingir a saturação. No mesmo Ensaio 17 - 5d.40min.0,41 mm/min, por exemplo, a bomba hidráulica foi desligada 10 minutos após ter sido detectado o início do escoamento, o que sugere que pouca água em excesso foi acumulada pelo substrato, e, conseqüentemente, essa pouca água demorou apenas 8 minutos para ser escoada.

Em contraste a isso, no Ensaio 26 - 3d.60min.0,31mm/min, o escoamento iniciou-se aos 15 minutos e a bomba hidráulica ficou ligada até os 60 minutos, tempo suficiente para que uma maior parcela de água em excesso ficasse acumulada no módulo, a qual demorou 46 minutos para ser escoada após o desligamento da bomba.

Ademais, independentemente da duração, o tempo de fim de escoamento no telhado verde sempre foi superior 44 minutos. Com isso, tem-se que a aplicação do telhado verde em questão pôde retardar o escoamento da água da chuva em 39 minutos a mais do que o telhado controle para chuvas de 60 minutos de duração, 22 minutos a mais para chuvas de 30 minutos de duração e 39 minutos para chuvas de 10 a 15 minutos de duração.

4.4. Volume de chuva necessário para ocorrência de escoamento

Durantes os ensaios, percebeu-se que quanto maior o período de estiagem equivalente, mais se demorava para iniciar o escoamento. A principal suposição que pode explicar esse desempenho do telhado verde é de que só há escoamento após o substrato atingir uma condição de saturação.

Visando quantificar o volume de chuva suportado pelo módulo antes que este apresente escoamento, foi multiplicado o valor da intensidade da chuva pelo tempo de início do escoamento. O resultado desta multiplicação representa a quantidade de chuva precipitada no módulo no momento em que a água começou a escoar. Com isso, foi feito um gráfico plotando-se o período de estiagem equivalente pelo volume de chuva equivalente (Figura 4.17).

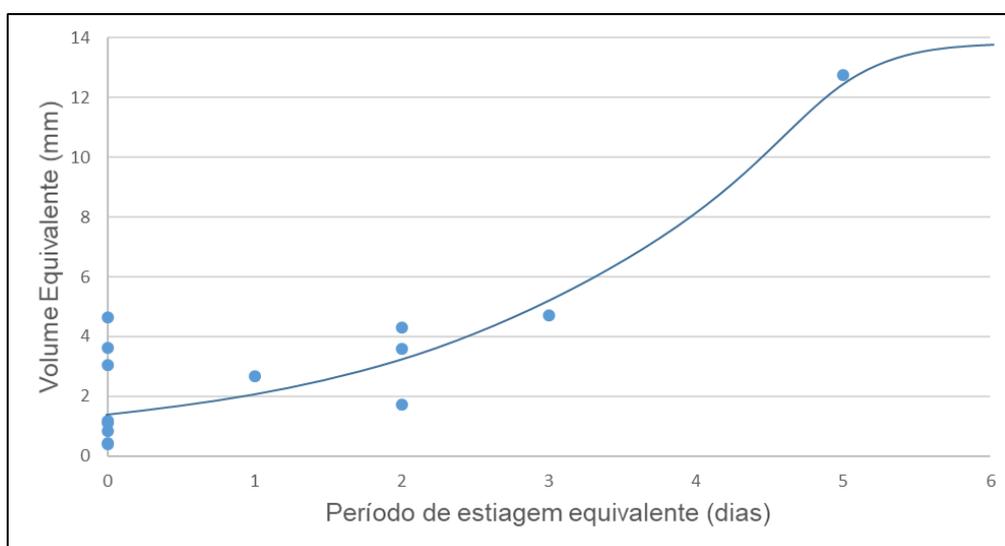


Figura 4.17: Volume de chuva equivalente no tempo de início de escoamento.

Não necessariamente esta é a capacidade de volume de chuva do módulo na qual este apresente 100% de retenção, pois é necessário um certo intervalo de tempo para que a água percole todas as camadas do módulo e seja escoada. Provavelmente o substrato já havia atingido a condição de saturação minutos antes da água começar a escoar. Mesmo assim, a obtenção do volume de chuva equivalente para ocorrência de escoamento nos permite comparar o quanto de água o protótipo de telhado verde consegue absorver sem que haja escoamento.

Conforme esperado, o volume de chuva equivalente tende a aumentar à medida em que o período de estiagem equivalente também aumenta. Considerando a grande variabilidade do teor de umidade possível para o período de estiagem equivalente de 0 dias (teor de umidade superior a 23,98%) e dado que há a necessidade de um certo intervalo de tempo para que a água percole todas as camadas do módulo até ser escoada, também era esperado que houvesse diferentes valores de volume de chuva equivalente para períodos de estiagem equivalente de 0 dias.

Contudo, observa-se um aumento significativo de volume de chuva equivalente entre os períodos de estiagem de 3 e 5 dias (de 4,75 mm para 12,76 mm de chuva). A capacidade máxima de volume chuva equivalente não foi medida, mas espera-se que este valor seja atingido em torno de 8 dias de estiagem, quando o teor de umidade do substrato atinge a casa dos 7%, valor próximo do teor de umidade mínimo medido (5,68%).

4.5. Variação do teor de umidade do substrato

A partir da análise do teor de umidade do substrato antes e após a chuva (Figura 4.18), foi possível perceber que há uma tendência do solo ganhar cerca de 25% de umidade. Para se fazer essa análise, foi necessário excluir pontos em que o teor de umidade estava muito elevado, pois nesta condição o substrato apresentava um aspecto de lama e, portanto, não fazia sentido analisar o teor de umidade nesta condição, visto que o método de análise do teor de umidade era feito a partir do recolhimento de amostras encontradas abaixo da placa de grama e na camada de cima do substrato, que era a área mais exposta ao acúmulo de água.

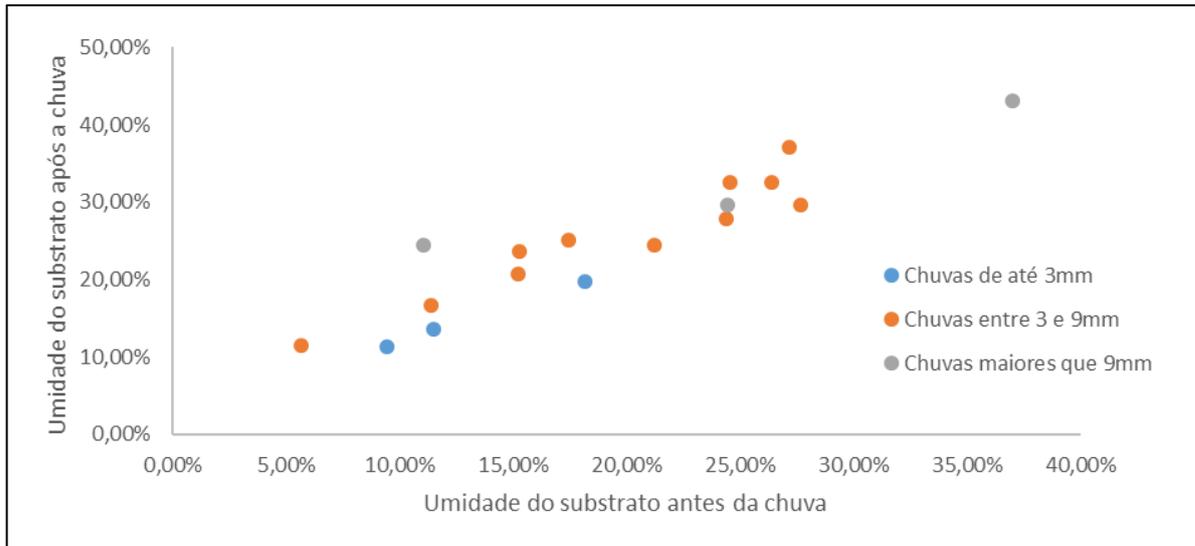


Figura 4.18: Valores de umidade inicial (antes da chuva) e final (após a chuva) do substrato.

Em outro caso em que o teor de umidade do substrato antes da chuva já apresentava um aspecto muito úmido, foi obtido um valor de o teor de umidade do substrato após a chuva inferior ao do valor obtido antes da simulação, sugerindo que o substrato já estava na condição saturada antes da simulação de chuva. Analisando-se o gráfico da Figura 4.18, percebe-se que o ponto mais distante da média (11,07%,24,47%) foi referente a uma chuva de maior volume (superiores a 9 mm), o que justifica uma maior variação do teor de umidade do substrato.

Por outro lado, os valores de teor de umidade do substrato antes da chuva inferiores a 20% que ficaram abaixo média foram justamente de chuvas mais fracas, com volumes precipitados inferiores a 3 mm. Além disso, também foi verificado a partir dos ensaios que todas as simulações que tiveram água escoada apresentaram valores de teor de umidade do substrato após a chuva acima de 24,41%.

Sob outra perspectiva, optou-se por analisar a variação de umidade em função do volume de chuva precipitado (Figura 4.19). Assim sendo, para se fazer uma análise mais coerente optou-se por excluir os dados que apresentaram teores de umidade muito elevados, assim como na análise anterior.

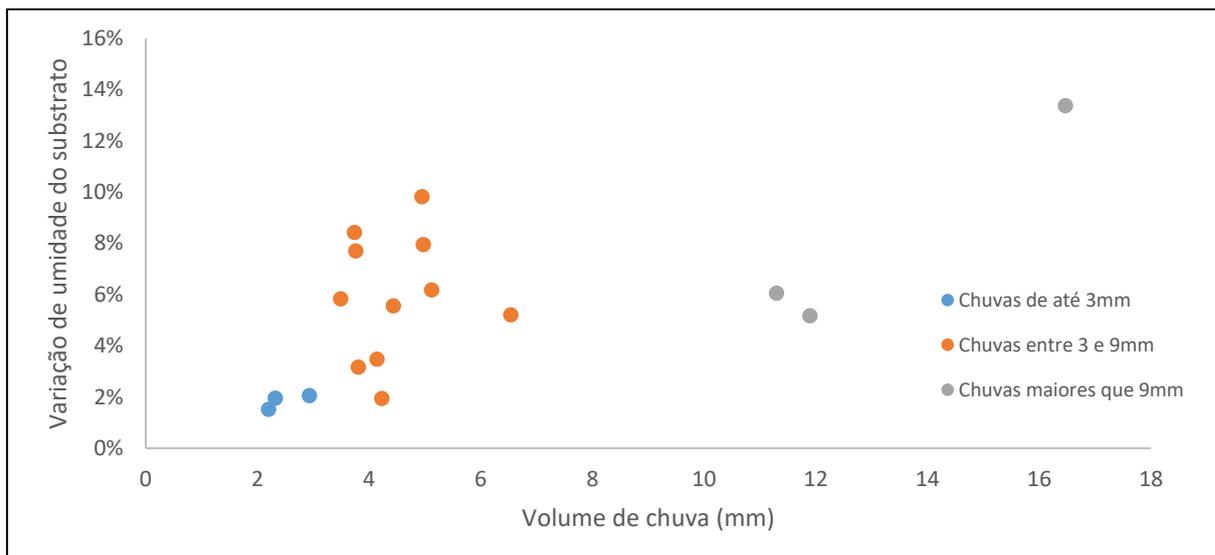


Figura 4.19: Variação da umidade do substrato em função do volume de chuva precipitado.

Os resultados mostraram que para chuvas com volumes de precipitação de até 3 mm, o teor de umidade do substrato aumentou cerca de 2%, ao passo que para chuvas com volumes de precipitação entre 3 e 9 mm, o acréscimo de teor de umidade do substrato variou de 2% a 10%, enquanto que para chuvas com maiores volumes de precipitação o acréscimo de teor de umidade do substrato variou de 5,17% a 13,38%. Esta grande variação nas chuvas com volumes precipitados de 3 mm a 9 mm e nas chuvas com volumes precipitados superiores a 9 mm podem ser explicados devido à variabilidade de valores de teor de umidade obtidos após as simulações de chuva nas ocasiões em que houve escoamento de água. Nesses casos, o solo estava saturado e o teor de umidade do substrato verificado após a simulação de chuva apresentou valores entre 24,45% e 50,32%. Logo, não foi possível identificar uma relação direta entre o ganho de umidade e o volume de chuva precipitado.

CAPÍTULO 5

Conclusões

O telhado verde mostrou-se como alternativa eficaz na capacidade em reter água de chuvas de baixa intensidade e em condições de período de estiagem. Com períodos de estiagem equivalente acima de dois dias, o telhado verde apresentou uma capacidade de retenção de água de 100% para chuvas de 30 minutos que variaram de 2,2 mm a 6,4 mm de volume. Por outro lado, para chuvas com o substrato úmido (período de estiagem equivalente de 0 dias), a capacidade de retenção de água de chuva do telhado verde variou de 2,02% a 48,41%. Tal fato, mostra que esses dois fatores influenciam fortemente o desempenho do telhado verde quanto à sua capacidade de retenção.

Apesar das condições em que o substrato esteve úmido apresentarem baixos valores de capacidade de retenção, o telhado verde ainda mostra benefícios quanto ao retardo do escoamento. Nos ensaios de calibração, onde se considerava a superfície impermeável, o escoamento se iniciava 1 min após o início da simulação de chuva e se terminava entre 7 min e 12 min após o fim da simulação de chuva. No entanto, o tempo de fim do escoamento nos telhados verdes se mostrou superior, variando entre 8 min a 47 min após o fim da simulação de chuva.

Quanto a relação da intensidade e a duração das chuvas, estes se mostraram fatores de influência secundários quando comparados ao período de estiagem equivalente ou teor de umidade do substrato. Nos ensaios realizados, não foi verificado o grau de saturação do substrato. Apesar disso, a partir do que foi observado nas simulações de chuva, sugere-se que somente há escoamento depois que o substrato se encontra com alto teor de umidade. Portanto chuvas de maiores volumes tendem a levar o substrato à condição saturada e, dessa forma, diminuir a capacidade de retenção do telhado verde.//

Estruturalmente, os materiais empregados na composição nas camadas funcionais conseguiram desempenhar as funções de filtro, drenagem e

impermeabilização. Quanto ao substrato utilizado, este forneceu nutrientes necessários ao crescimento da grama esmeralda. Por sua vez, a vegetação apresentando uma condição murcha e seca para períodos de estiagem de 10 dias. Logo, sugere-se que sejam feitas pesquisas utilizando outros tipos de vegetação com outras combinações de composição do substrato.

A utilização do simulador de chuvas se mostrou bastante útil por proporcionar a possibilidade de ajustar a intensidade, duração e volume de chuvas. Apesar disso, a sua utilização apresentou diversas desvantagens devido a condições meteorológicas, a infraestrutura local e aos materiais utilizados. Portanto, deve-se levar em conta a real necessidade de utilizá-lo, pois a utilização de um simulador requer estruturas e materiais ideais que elevam o custo da pesquisa. Para avaliar a real aplicação para as condições locais, sugere-se utilizar módulos vegetados que possam coletar amostras de eventos de chuvas reais, utilizando-se equipamentos de medição e monitoramento.

CAPÍTULO 6

Recomendações para futuras pesquisas

O estudo feito por meio de simulações de chuva tem como principal vantagem a possibilidade de ajustar a intensidade, duração e volume de chuvas. Além disso, as simulações de chuva também são úteis para casos em que há escassez de eventos de chuvas naturais. Por outro lado, o método pode apresentar diversas desvantagens. No caso da presente pesquisa os principais problemas ocorreram devido a condições meteorológicas, a infraestrutura oferecida e aos materiais utilizados.

Como o objetivo da pesquisa envolvia a análise da capacidade de retenção em relação ao período de estiagem (com diferentes teores de umidade antecedente à simulação de chuva), por vezes ocorreu de chover antes do período de estiagem desejado, e a única forma encontrada de analisar o solo com diferentes teores de umidade era com a secagem natural. Logo, em épocas de chuva, era difícil esperar o solo secar por mais de 5 dias sem que ocorresse eventos de chuva real.

Do mesmo modo, também ocorreu de chover durante a simulação de chuva, o que exigia a interrupção da simulação tanto devido aos cuidados com os materiais eletrônicos utilizados (bomba hidráulica, balança, extensões) como devido à falta de controle das variáveis da chuva (duração, intensidade, volume). Por condições financeiras e estruturais, escolheu-se por não utilizar uma cobertura que impedisse a água de chuva natural infiltrar no solo. Além disso, a vegetação também necessita da luz solar para que possa absorver nutrientes.

Outra condição meteorológica que influenciou na simulação de chuva foi a direção e intensidade da força do vento. Por mais que tenha sido feito um isolamento nas laterais do local escolhido com lonas resistentes e também tenha sido feita uma calibração do simulador, não foi possível evitar a passagem de vento no local. Com isso, foi constatado que em algumas vezes o vento impedia que a chuva fosse distribuída uniformemente em todo o módulo, o que foi verificado a partir das diferentes leituras obtidas nos pluviômetros.

Em relação à infraestrutura do Núcleo de Tecnologia Industrial do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, foram observadas ocasiões em houve falta de fornecimento de água ou energia no edifício. Quando ocorria a falta de energia, era impossível executar o ensaio devido aos equipamentos eletrônicos, enquanto que a falta de água impedia a execução do ensaio somente quando era necessário abastecer o reservatório de 250 litros. Ademais, a vegetação local cresceu, subindo na lona e se segurou no simulador (Figura 6.1). Com isso, há a necessidade de realizar a poda da vegetação periodicamente a fim de evitar que a mesma danifique o simulador ou módulo, despeje sementes de outro tipo de vegetação sobre o módulo e ainda não obstrua a água da chuva durante a simulação.



Figura 6.1: a) Local utilizado para realização da simulação de chuvas com terreno limpo b) Mesmo local, com vegetação subindo e cobrindo a estrutura de isolamento utilizada.

As outras dificuldades encontradas foram devido às limitações dos materiais empregados e da metodologia utilizada. A bomba hidráulica, a mesma utilizada por Louzada (2016), parava de funcionar quando se pretendia utilizar intensidades de chuva superiores a 0,4 mm/min, enquanto Louzada (2016) conseguiu atingir intensidades superiores a 1,3 mm/min. A base do módulo, outro material aproveitado da pesquisa de Louzada (2016) e Miranda (2016), já apresentava sinais de desgaste e ataque de cupins. Inicialmente, esta presente pesquisa tinha como objetivo analisar a capacidade de retenção em função da inclinação do módulo, mas tal análise não foi possível de se executar devido a possibilidade do módulo ceder e não poder utilizá-lo mais.

O recolhimento de amostras para aferição do teor de umidade do substrato antecedente à simulação de chuva foi possível por meio da secagem do solo em estufas. Para recolher a amostra do substrato, era necessário levantar a grama, o que impedia que a mesma ancorasse suas raízes no solo para garantir os nutrientes necessários ao seu crescimento. Desse modo, percebeu-se que a grama ficava com um aspecto “morto” nas regiões em que se recolhia o substrato (Figura 3.10).

Por outro lado, o simulador também apresentou suas limitações. Devido às condições climáticas e ao tempo em que ficou exposto, foi necessário trocar as conexões por causa de vazamentos e refazer a calibração do simulador. Com o tempo, a madeira próxima a válvula de drenagem apodreceu, o que também levou à ocorrência de vazamentos. Além disso, diversas vezes foi observado que o microaspersor se apresentava parcialmente ou totalmente obstruído, mesmo tampando o reservatório para que a água estivesse limpa e livre de partículas sólidas. Quando o microaspersor ficava totalmente obstruído, era necessário suspender o ensaio e retirá-lo das conexões para fazer a limpeza.

Com todos os problemas encontrados nesta pesquisa, recomenda-se verificar a potência do conjunto de abastecimento e simulação de chuvas para que esta possa simular a chuva com intensidade e duração desejada, não utilizar microaspersores, isolar a área reservada para impedir a interferência de fatores atmosféricos e empregar instrumentos de medição e monitoramento mais eficazes.

Levando em conta todos os outros possíveis benefícios oferecidos pelos telhados verdes (térmicos, econômicos, mitigador da poluição do ar, estéticos), sugere-se a análise do desempenho do telhado verde quanto a esses aspectos para a localidade de Natal, Rio Grande do Norte, a fim de reforçar as vantagens e a viabilidade do emprego dos telhados verdes às edificações.

Referências Bibliográficas

Aitkenhead-Peterson, J. A., Dvorak, B. D., Volder, A., Stanley, N. C. (2011). **Chemistry of growth medium and leachate from green roof systems in south-central Texas**. Urban Ecosystem. Vol. 14. p. 17-33.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12553: Geossintéticos – Terminologia**. Rio de Janeiro. 2002.

Barrio, E. P. D. (1998). **Analysis of the green roofs cooling potential in buildings**. Energy and Buildings. Vol. 27. p. 179-193.

Bates, A. J., Sadler, J. P., Mackay, R. (2013). **Vegetation development over four years on two green roofs in the UK**. Urban Forestry & Urban Greening. Vol 12. p. 98-108.

Berntdsson, J.C. (2010). **Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review**. Ecological Engineering. Vol. 36, p.351-360.

Blank, L.; Vasl, A.; Levy, S.; Grant, G.; Kadas G., Dafni, A.; Blaustein, L. (2013). **Directions in green roof research: a bibliometric study**. Building Environment. Vol. 66. p. 23-28.

Butler, C.; Orians, C. M. (2011). **Sedum cools soil and can improve neighboring plant performance during water deficit on a green roof**. Ecological Engineering. Vol. 36. p. 1796-1803.

Carpenter, C. M. G.; Todorov, D.; Driscoll, C. T; Montesdeoca, M. (2016). **Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations**. Environmental Pollution. Vol. 218. p. 664-672.

Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei Nº 1703, de 2011**. Disponível em: <http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=893728&filename=PL+1703/2011>. Acesso em: 24 mar. 2017.

Caputo, H. P. (1977): Mecânica dos solos e suas aplicações. 5ª Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 241 p.

Connelly, M.; Hodgson, M. (2013). **Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs**. Applied Acoustics. Vol. 74. p. 1136-1143.

Cook-Patton, S. C.; Bauerle, T. L. (2012). **Potential Benefits of Plant Diversity on Vegetated Roofs: A literature Review**. Journal of the Environmental Management. Vol. 106. p. 82-95.

Dawson, D. (2002). Plant-covered Roofs Ease Urban Heat. **National Geographics News**. nov. 2002. Disponível em: https://news.nationalgeographic.com/news/2002/11/1115_021115_GreenRoofs.html.

Acesso em: 10 abr. 2018.

Dunnett, N., Kingsbury, N. **Planting Green Roofs and Living Walls**. Timber Press. 2004. Portland, OR.

Dvorak B., Volder, A. (2010). **Green roof vegetation for North American ecoregions: a literature review**. Landscape Urban Planning Vol. 96 p. 197–213.

Ekaterini, E.; Dimitris, A. (1998). **The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece**. Energy and Buildings. Vol. 27. p. 27:29-36.

Farrel, C.; Ang, X. Q.; Rayner, J. P. (2013). **Water-retention additives increase plant available water in green roof substrates**. Ecological Engineering. Vol. 52. p. 112-118.

FERREIRA, Lucas Augusto Prudente. **Análise comparativa do atraso no escoamento, e da quantidade e qualidade de água pluvial escoada em telhado verde extensivo e de fibrocimento**. 2015. 44p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Departamento Acadêmico de Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2015.

Getter, K. L; Rowe, D. B; Andresen, J. A. (2007). **Quantifying effect of slope on extensive green roof stormwater retention**. Ecological Engineering. Vol. 31. p. 225-231.

Godoy, L.J.G.; Villas Bôas, R.L. **Calagem e adubação para gramados: Como potencializar a produção e a manutenção**. In: VILLAS BÔAS, R.L; GODOY, L.J.G.; LIMA, C.P.; BACKES, C. Tópicos atuais em gramados. Botucatu: UNESP, 2008, cap.1 p.2-19.

Graceson, A., Hare, M. Monaghan, J. Hall, N. (2013). **The water retention capabilities of growing media for green roofs**. Ecological Engineering. Vol. 61. p. 328-334.

Gregoire, B. G.; Clausen, J. C. (2011). **Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality**. Ecological Engineering. Vol. 37. p. 963-969. Green Roof Outfitters. **Planting Options**. Disponível em: <http://greenroofoutfitters.com/green-roofing-products/modular-green-roof-system/planting-options/>>. Acesso em: 24 de mar. 2017.

Hashemi, S. S. G.; Mahmud, H. B.; Ashraf, M. A. (2015). **Performance of green roofs with respect to water quality and recution of energy consumption in tropics: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 52. P. 669-679.

Hernández, J. D; Luengas, A. L. M. (1997). **Green roof systems**. Transactions on ecology and the environment. Vol. 16. P. 615-624.

IGS Brasil – Associação Brasileira de Geossintéticos. **Funções dos geossintéticos**. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/2.pdf>>. Acesso em: 24 de mar. 2017.

Kolb, W. (2003) **Telhados de cobertura verde e manejo de águas pluviais**. Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Águas Pluviais. Vol. 4. Juazeiro.

Lee, J. Y.; Moon, H. J.; Kim, T. I.; Kim, H. W.; Han, M. Y. (2013). **Quantitative analysis on the urban flood mitigation effect by the extensive green roof system**. Environmental Pollution. Vol. 181. p. 257-261.

Lima, G. C. de O. **Avaliação do desempenho de telhados verdes: capacidade de retenção hídrica e qualidade da água escoada**. Caruaru, 2013. 128 f. Dissertação (mestrado) - UFPE, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2013.

Li, J. F.; Wai, O. W. H.; Li, Y. S.; Zhan, J-M.; Ho, Y. A; Li, J.; Lam, E. (2010). **Effect of green roof on ambient CO₂ concentration**. Building and Environment. Vol. 45. p. 2644-2651.

Louzada, T. S. **Emprego de geossintéticos na construção de telhados verdes: análise da capacidade de retenção de água**. Natal, 2016. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2016.

Luckett, K. L. A. P. **Green Roof Construction and Maintenance**. McGraw-Hill's Greensource Series. 2009. 208 p.

Mentens, J.; Raes, D.; Hermy, M. (2006). **Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?**. Landscape and Urban Planning. Vol. 77. p. 217-226.

Miranda, F. C. B. **Influência do período de estiagem no desempenho de telhados verdes**. 2016. 21 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2016.

Moran, A.; Hunt, B.; Jennings, G. (2003). **A North Carolina field study to evaluate greenroof runoff quantity, runoff, quality, and plant growth**. World Water & Environmental Resources Congress. 10 p.

Morgan, S. P. E.; Celik, S.; Retzlaff, W. (2013). **Green roof storm-water runoff quantity and quality**. Journal of Environmental Engineering. Vol. 139. p.471-478.

Moruzzi, R. B.; Moura, C. C. de; Barbassa, A. (2014) **Avaliação do efeito da inclinação e umidade antecedente na qualidade e quantidade das parcelas escoadas, percoladas e armazenadas em telhado verde extensivo**. Ambiente Construído. Vol. 14. p. 59-73.

Nagase, A., Dunnet, N. (2011). **The relationship between percentage of organic matter in substrate and growth in extensive green roofs**. Landscape Urban Planning. Vol. 103. p. 230-236.

Niachou, A.; Papakonstatiniu, K.; Santamouris, M.; Tsangrassoulis, A.; Mihalakakou, G. (2001). **Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance.** Energy and Buildings. Vol. 33. P. 719-729.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. Secretaria de Vias Públicas. **Diretrizes de Projetos de Hidráulica e Drenagem.** 1999. Disponível em: <[http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/NORMAS_TÉCNICAS_INSTRUÇÕES_NOVAS/Hidráulica e drenagem urbana/DH-H01.pdf](http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/NORMAS_TÉCNICAS_INSTRUÇÕES_NOVAS/Hidráulica_e_drenagem_urbana/DH-H01.pdf)>. Acesso em: 12. de abr. 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL. Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo. **Plano Municipal de Redução de Riscos do Município de Natal – Relatório Final.** Vol. 1. 2008. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ah_UKEwjBzfDThavTAhUDkJAKHRqzBAQQFggjMAA&url=https%3A%2F%2Fnatal.rn.gov.br%2Fsemurb%2Fpaginas%2FFile%2FPublicacoes%2FReducao_riscos%2FVol_1_-_REL_AREAS_RISCO_-_Final.pdf&usq=AFQjCNFgPCK0uNgO8LH0sympMtd_0zjREg&sig2=iAFC6YbbPv7w1CyX8lJmsQ&cad=rja>. Acesso em 12 de abr. 2017.

Rowe, D. B. (2011). **Green roofs as means of pollution abatement.** Environmental Pollution. Vol. 159, p. 2100-2110.

Rugh, C. L.; Fernandez, R. T. (2005). **Green Roof Stormwater Retention: Effect of Roof Surface, Slope and Media Depth.** Journal of Environmental Quality. Vol. 34. p. 1036-1044.

Saadatian, O.; Sopian, K.; Salleh, E.; Lim, C.h.; Riffat, S.; Saadatian, E.; Toudeshki, A.; Sulaiman, M.Y. (2013). **A review of energy aspects of green roofs.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 23. p. 155-168.

Santamouris, M. (2014). **Cooling the cities – a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments.** Solar Energy. Vol. 103. p. 682-703.

Seidl, M.; Gromaire, M.; Saad, M.; De Gouvello, B. (2013). **Effect of substrate depth and rain-event history on the pollutant abatement of green roofs.** Environmental Pollution. Vol. 183. p. 195-203.

Speak A. F., Rothwell J.J., Lindley S.J., Smith C.L. (2012). **Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city.** Atmospheric Environment. Vol. 61 p. 283–93.

Site da Câmara Municipal de Porto Alegre. **Telhados Verdes Poderão Ser Obrigatório em Prédios Públicos.** Disponível em: <<http://www.camarapoa.rs.gov.br/noticias/telhados-verdes-poderao-ser-obrigatorios-em-predios-publicos>>. Acesso em: 24 de mar. 2017.

Stovin, V. (2010). **The potential of green roofs to manage urban stormwater.** Water and Environment. Journal. Vol. 24, p. 192–199.

- Stovin, V., Vesuviano, G., Kasmin, H. (2012). **The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions.** Journal of Hydrology. Vol. 414–415. p. 148–161.
- Townshend, D. (2007). **Study on green roof application in Hong Kong: Final Report.** Departamento de Serviços Arquitetônicos. Hong Kong. 157p.
- Van Renterghem, T.; Botteldooren, D. (2008). **Numerical evaluation of sound propagating over green roofs.** Journal of Sound and Vibration. Vol. 317. p. 781-799.
- Van Seters, T.; Rocha, L.; Smith, D.; MacMillan, G. (2009). **Evaluation of green roofs for runoff retention, runoff quality, and leachability.** Water Quality Research Journal of Canada. Vol. 44. p. 33-47.
- Vijayaraghavan K., Joshi U. M. (2015) **Application of seaweed as substrate additive in green roofs: enhancement of water retention and sorption capacity.** Landscape Urban Planning. Vol. 143 p. 25–32.
- Vijayaraghavan, K.; Raja, F. D. (2014). **Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption.** Water Research. Vol. 63. p. 94-101.
- Vijayaraghavan, K. (2016). **Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 57, p. 740-752.
- Villarreal, E. L.; Bengtsson, L. (2005). **Response of a sedum green-roof to individual rain events.** Ecological Engineering. Vol. 25. p. 1-7.
- Williams, N. S. G; Rayner, J. P.; Raynor, K. J. (2010). **Green roofs for a wide brown land: Opportunities and barriers for rooftop greening in Australia.** Urban Forestry and Urban Greening. Vol. 9. p. 245-251.
- Yang, H. S.; Kang, J.; Choi, M. S. (2012). **Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level.** Building and Environment. Vol. 50. p. 44-55.
- Yang, J; Yu, Q.; Gong, P. (2008). **Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago.** Atmospheric Environment. Vol. 42. p. 7266-7273.
- Zhang, X.; Shen, L.; Tam, V. W. Y.; Lee, W. W. Y. (2012). **Barriers to implement extensive green roof systems: A Hong Kong Study.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 16. p. 314-319.

APÊNDICE A

Planilhas dos ensaios realizados na calibração do segundo simulador

Ensaio de simulação de chuva com durações de 10 minutos:

Tempo (min)	Calibração 10.1			Calibração 10.2			Calibração 10.3		
	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)
0	10,46	0,00	0,08	14,16	0,00	0,06	0,98	0,00	0,14
1	10,54	0,08	0,30	14,22	0,06	0,42	1,12	0,14	0,26
2	10,84	0,38	0,38	14,64	0,48	0,44	1,38	0,40	0,20
3	11,22	0,76	0,36	15,08	0,92	0,40	1,58	0,60	0,30
4	11,58	1,12	0,32	15,48	1,32	0,38	1,88	0,90	0,28
5	11,90	1,44	0,34	15,86	1,70	0,42	2,16	1,18	0,28
6	12,24	1,78	0,36	16,28	2,12	0,42	2,44	1,46	0,26
7	12,60	2,14	0,36	16,70	2,54	0,36	2,70	1,72	0,28
8	12,96	2,50	0,38	17,06	2,90	0,36	2,98	2,00	0,28
9	13,34	2,88	0,38	17,42	3,26	0,44	3,26	2,28	0,30
10	13,72	3,26	0,20	17,86	3,70	0,32	3,56	2,58	0,20
11	13,92	3,46	0,12	18,18	4,02	0,26	3,76	2,78	0,08
12	14,04	3,58	0,02	18,44	4,28	0,06	3,84	2,86	0,02
13	14,06	3,60	0,02	18,50	4,34	0,04	3,86	2,88	0,04
14	14,08	3,62	0,02	18,54	4,38	0,04	3,90	2,92	0,02
15	14,10	3,64	0,02	18,58	4,42	0,02	3,92	2,94	0,02
16	14,12	3,66	0,00	18,60	4,44	0,04	3,94	2,96	0,00
17	14,12	3,66	0,02	18,64	4,48	0,02	3,94	2,96	0,00
18	14,14	3,68	0,00	18,66	4,50	0,02	3,94	2,96	0,00
19	14,14	3,68	0,00	18,68	4,52	0,00	3,94	2,96	0,02
20	14,14	3,68	0,00	18,68	4,52	0,00	3,96	2,98	0,00
21	14,14	3,68	0,00	18,68	4,52	0,00	3,96	2,98	0,00
22	14,14	3,68	0,00	18,68	4,52	0,00	3,96	2,98	0,00
23	14,14	3,68	0,00	18,68	4,52	0,00	3,96	2,98	0,00
24	14,14	3,68	0,00	18,68	4,52	0,00	3,96	2,98	0,00
25	14,14	3,68	0,00	18,68	4,52	0,00	3,96	2,98	0,00
26	14,14	3,68	0,00	18,68	4,52	0,00	3,96	2,98	0,00
27	14,14	3,68	0,00	18,68	4,52	0,00	3,96	2,98	0,00
28	14,14	3,68	0,00	18,68	4,52	0,00	3,96	2,98	0,00
29	14,14	3,68	0,00	18,68	4,52	0,00	3,96	2,98	0,00
30	14,14	3,68	0,00	18,68	4,52	0,00	3,96	2,98	0,00

Ensaio de simulação de chuva com durações de 24 e 30 minutos:

Tempo	Calibração 24.1			Calibração 30.1			Calibração 30.2		
	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)
0	1,08	0,00	0,20	0,96	0,00	0,18	0,92	0,00	0,04
1	1,28	0,20	0,38	1,14	0,18	0,32	0,96	0,04	0,30
2	1,66	0,58	0,38	1,46	0,50	0,32	1,26	0,34	0,28
3	2,04	0,96	0,42	1,78	0,82	0,30	1,54	0,62	0,30
4	2,46	1,38	0,44	2,08	1,12	0,30	1,84	0,92	0,28
5	2,90	1,82	0,36	2,38	1,42	0,26	2,12	1,20	0,28
6	3,26	2,18	0,40	2,64	1,68	0,26	2,40	1,48	0,28
7	3,66	2,58	0,36	2,90	1,94	0,28	2,68	1,76	0,26
8	4,02	2,94	0,36	3,18	2,22	0,28	2,94	2,02	0,26
9	4,38	3,30	0,38	3,46	2,50	0,30	3,20	2,28	0,28
10	4,76	3,68	0,38	3,76	2,80	0,26	3,48	2,56	0,30
11	5,14	4,06	0,36	4,02	3,06	0,26	3,78	2,86	0,26
12	5,50	4,42	0,34	4,28	3,32	0,30	4,04	3,12	0,28
13	5,84	4,76	0,34	4,58	3,62	0,24	4,32	3,40	0,26
14	6,18	5,10	0,38	4,82	3,86	0,30	4,58	3,66	0,30
15	6,56	5,48	0,36	5,12	4,16	0,32	4,88	3,96	0,26
16	6,92	5,84	0,36	5,44	4,48	0,24	5,14	4,22	0,30
17	7,28	6,20	0,38	5,68	4,72	0,26	5,44	4,52	0,26
18	7,66	6,58	0,36	5,94	4,98	0,28	5,70	4,78	0,24
19	8,02	6,94	0,34	6,22	5,26	0,26	5,94	5,02	0,24
20	8,36	7,28	0,42	6,48	5,52	0,26	6,18	5,26	0,24
21	8,78	7,70	0,40	6,74	5,78	0,24	6,42	5,50	0,28
22	9,18	8,10	0,38	6,98	6,02	0,28	6,70	5,78	0,28
23	9,56	8,48	0,36	7,26	6,30	0,24	6,98	6,06	0,26
24	9,92	8,84	0,14	7,50	6,54	0,26	7,24	6,32	0,30
25	10,06	8,98	0,06	7,76	6,80	0,28	7,54	6,62	0,30
26	10,12	9,04	0,02	8,04	7,08	0,32	7,84	6,92	0,28
27	10,14	9,06	0,02	8,36	7,40	0,24	8,12	7,20	0,26
28	10,16	9,08	0,02	8,60	7,64	0,28	8,38	7,46	0,32
29	10,18	9,10	0,00	8,88	7,92	0,26	8,70	7,78	0,30
30	10,18	9,10	0,02	9,14	8,18	0,20	9,00	8,08	0,28
31	10,20	9,12	0,00	9,34	8,38	0,34	9,28	8,36	0,30
32	10,20	9,12	0,00	9,68	8,72	0,28	9,58	8,66	0,28
33	10,20	9,12	0,00	9,96	9,00	0,30	9,86	8,94	0,30
34	10,20	9,12	0,00	10,26	9,30	0,28	10,16	9,24	0,28
35	10,20	9,12	0,00	10,54	9,58	0,26	10,44	9,52	0,32
36	10,20	9,12	0,00	10,80	9,84	0,26	10,76	9,84	0,28
37	10,20	9,12	0,00	11,06	10,10	0,26	11,04	10,12	0,30

Tempo	Calibração 24.1			Calibração 30.1			Calibração 30.2		
	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)
38	10,20	9,12	0,00	11,32	10,36	0,28	11,34	10,42	0,30
39	10,20	9,12	0,00	11,60	10,64	0,28	11,64	10,72	0,34
40	10,20	9,12	0,00	11,88	10,92	0,24	11,98	11,06	0,22
41	10,20	9,12	0,00	12,12	11,16	0,32	12,20	11,28	0,24
42	10,20	9,12	0,00	12,44	11,48	0,28	12,44	11,52	0,30
43	10,20	9,12	0,00	12,72	11,76	0,32	12,74	11,82	0,30
44	10,20	9,12	0,00	13,04	12,08	0,30	13,04	12,12	0,34
45	10,20	9,12	0,00	13,34	12,38	0,24	13,38	12,46	0,28
46	10,20	9,12	0,00	13,58	12,62	0,26	13,66	12,74	0,28
47	10,20	9,12	0,00	13,84	12,88	0,30	13,94	13,02	0,28
48	10,20	9,12	0,00	14,14	13,18	0,24	14,22	13,30	0,30
49	10,20	9,12	0,00	14,38	13,42	0,28	14,52	13,60	0,24
50	10,20	9,12	0,00	14,66	13,70	0,30	14,76	13,84	0,26
51	10,20	9,12	0,00	14,96	14,00	0,28	15,02	14,10	0,34
52	10,20	9,12	0,00	15,24	14,28	0,26	15,36	14,44	0,26
53	10,20	9,12	0,00	15,50	14,54	0,26	15,62	14,70	0,24
54	10,20	9,12	0,00	15,76	14,80	0,24	15,86	14,94	0,32
55	10,20	9,12	0,00	16,00	15,04	0,28	16,18	15,26	0,22
56	10,20	9,12	0,00	16,28	15,32	0,26	16,40	15,48	0,30
57	10,20	9,12	0,00	16,54	15,58	0,30	16,70	15,78	0,34
58	10,20	9,12	0,00	16,84	15,88	0,28	17,04	16,12	0,30
59	10,20	9,12	0,00	17,12	16,16	0,24	17,34	16,42	0,32
60	10,20	9,12	0,00	17,36	16,40	0,20	17,66	16,74	0,24
61	10,20	9,12	0,00	17,56	16,60	0,08	17,90	16,98	0,10
62	10,20	9,12	0,00	17,64	16,68	0,04	18,00	17,08	0,04
63	10,20	9,12	0,00	17,68	16,72	0,02	18,04	17,12	0,02
64	10,20	9,12	0,00	17,70	16,74	0,02	18,06	17,14	0,02
65	10,20	9,12	0,00	17,72	16,76	0,00	18,08	17,16	0,00
66	10,20	9,12	0,00	17,72	16,76	0,02	18,08	17,16	0,02
67	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,10	17,18	0,02
68	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,12	17,20	0,00
69	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,12	17,20	0,02
70	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
71	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
72	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
73	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
74	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
75	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
76	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
77	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
78	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00

Tempo	Calibração 24.1			Calibração 30.1			Calibração 30.2		
	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)
79	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
80	10,20	9,12	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00

Ensaio de simulação de chuva com durações de 60 minutos:

Tempo	Calibração 60.1			Calibração 60.2			Calibração 60.3		
	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)
0	0,96	0,00	0,02	0,96	0,00	0,18	0,92	0,00	0,04
1	0,98	0,02	0,32	1,14	0,18	0,32	0,96	0,04	0,30
2	1,30	0,34	0,32	1,46	0,50	0,32	1,26	0,34	0,28
3	1,62	0,66	0,38	1,78	0,82	0,30	1,54	0,62	0,30
4	2,00	1,04	0,34	2,08	1,12	0,30	1,84	0,92	0,28
5	2,34	1,38	0,32	2,38	1,42	0,26	2,12	1,20	0,28
6	2,66	1,70	0,32	2,64	1,68	0,26	2,40	1,48	0,28
7	2,98	2,02	0,30	2,90	1,94	0,28	2,68	1,76	0,26
8	3,28	2,32	0,30	3,18	2,22	0,28	2,94	2,02	0,26
9	3,58	2,62	0,34	3,46	2,50	0,30	3,20	2,28	0,28
10	3,92	2,96	0,28	3,76	2,80	0,26	3,48	2,56	0,30
11	4,20	3,24	0,34	4,02	3,06	0,26	3,78	2,86	0,26
12	4,54	3,58	0,34	4,28	3,32	0,30	4,04	3,12	0,28
13	4,88	3,92	0,30	4,58	3,62	0,24	4,32	3,40	0,26
14	5,18	4,22	0,30	4,82	3,86	0,30	4,58	3,66	0,30
15	5,48	4,52	0,30	5,12	4,16	0,32	4,88	3,96	0,26
16	5,78	4,82	0,30	5,44	4,48	0,24	5,14	4,22	0,30
17	6,08	5,12	0,36	5,68	4,72	0,26	5,44	4,52	0,26
18	6,44	5,48	0,32	5,94	4,98	0,28	5,70	4,78	0,24
19	6,76	5,80	0,30	6,22	5,26	0,26	5,94	5,02	0,24
20	7,06	6,10	0,30	6,48	5,52	0,26	6,18	5,26	0,24
21	7,36	6,40	0,34	6,74	5,78	0,24	6,42	5,50	0,28
22	7,70	6,74	0,30	6,98	6,02	0,28	6,70	5,78	0,28
23	8,00	7,04	0,28	7,26	6,30	0,24	6,98	6,06	0,26
24	8,28	7,32	0,30	7,50	6,54	0,26	7,24	6,32	0,30
25	8,58	7,62	0,32	7,76	6,80	0,28	7,54	6,62	0,30
26	8,90	7,94	0,30	8,04	7,08	0,32	7,84	6,92	0,28
27	9,20	8,24	0,30	8,36	7,40	0,24	8,12	7,20	0,26
28	9,50	8,54	0,30	8,60	7,64	0,28	8,38	7,46	0,32

Tempo	Calibração 60.1			Calibração 60.2			Calibração 60.3		
	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)
29	9,80	8,84	0,28	8,88	7,92	0,26	8,70	7,78	0,30
30	10,08	9,12	0,38	9,14	8,18	0,20	9,00	8,08	0,28
31	10,46	9,50	0,30	9,34	8,38	0,34	9,28	8,36	0,30
32	10,76	9,80	0,40	9,68	8,72	0,28	9,58	8,66	0,28
33	11,16	10,20	0,22	9,96	9,00	0,30	9,86	8,94	0,30
34	11,38	10,42	0,34	10,26	9,30	0,28	10,16	9,24	0,28
35	11,72	10,76	0,32	10,54	9,58	0,26	10,44	9,52	0,32
36	12,04	11,08	0,34	10,80	9,84	0,26	10,76	9,84	0,28
37	12,38	11,42	0,34	11,06	10,10	0,26	11,04	10,12	0,30
38	12,72	11,76	0,30	11,32	10,36	0,28	11,34	10,42	0,30
39	13,02	12,06	0,30	11,60	10,64	0,28	11,64	10,72	0,34
40	13,32	12,36	0,30	11,88	10,92	0,24	11,98	11,06	0,22
41	13,62	12,66	0,32	12,12	11,16	0,32	12,20	11,28	0,24
42	13,94	12,98	0,30	12,44	11,48	0,28	12,44	11,52	0,30
43	14,24	13,28	0,28	12,72	11,76	0,32	12,74	11,82	0,30
44	14,52	13,56	0,30	13,04	12,08	0,30	13,04	12,12	0,34
45	14,82	13,86	0,28	13,34	12,38	0,24	13,38	12,46	0,28
46	15,10	14,14	0,30	13,58	12,62	0,26	13,66	12,74	0,28
47	15,40	14,44	0,30	13,84	12,88	0,30	13,94	13,02	0,28
48	15,70	14,74	0,34	14,14	13,18	0,24	14,22	13,30	0,30
49	16,04	15,08	0,28	14,38	13,42	0,28	14,52	13,60	0,24
50	16,32	15,36	0,28	14,66	13,70	0,30	14,76	13,84	0,26
51	16,60	15,64	0,32	14,96	14,00	0,28	15,02	14,10	0,34
52	16,92	15,96	0,22	15,24	14,28	0,26	15,36	14,44	0,26
53	17,14	16,18	0,28	15,50	14,54	0,26	15,62	14,70	0,24
54	17,42	16,46	0,28	15,76	14,80	0,24	15,86	14,94	0,32
55	17,70	16,74	0,28	16,00	15,04	0,28	16,18	15,26	0,22
56	17,98	17,02	0,28	16,28	15,32	0,26	16,40	15,48	0,30
57	18,26	17,30	0,28	16,54	15,58	0,30	16,70	15,78	0,34
58	18,54	17,58	0,26	16,84	15,88	0,28	17,04	16,12	0,30
59	18,80	17,84	0,30	17,12	16,16	0,24	17,34	16,42	0,32
60	19,10	18,14	0,18	17,36	16,40	0,20	17,66	16,74	0,24
61	19,28	18,32	0,12	17,56	16,60	0,08	17,90	16,98	0,10
62	19,40	18,44	0,04	17,64	16,68	0,04	18,00	17,08	0,04
63	19,44	18,48	0,02	17,68	16,72	0,02	18,04	17,12	0,02
64	19,46	18,50	0,02	17,70	16,74	0,02	18,06	17,14	0,02
65	19,48	18,52	0,02	17,72	16,76	0,00	18,08	17,16	0,00
66	19,50	18,54	0,02	17,72	16,76	0,02	18,08	17,16	0,02
67	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,10	17,18	0,02
68	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,12	17,20	0,00
69	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,12	17,20	0,02

Tempo	Calibração 60.1			Calibração 60.2			Calibração 60.3		
	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)	Massa (kg)	Volume escoado acumulado (L)	Vazão (L/min)
70	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
71	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
72	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
73	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
74	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
75	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
76	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
77	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
78	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
79	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00
80	19,52	18,56	0,00	17,74	16,78	0,00	18,14	17,22	0,00

APÊNDICE B

Planilhas dos ensaios realizados no telhado verde com o primeiro simulador

Valores de teor de umidade antes e após as chuvas dos ensaios 01 ao 10:

Ensaio	Teor de umidade do substrato antes da chuva	Teor de umidade do substrato após a chuva
Ensaio 01 - 0d.30min.0,14mm/min	34,50%	-
Ensaio 02 - 3d.30min.0,12mm/min	15,28%	23,71%
Ensaio 03 - 1d.30min.0,14mm/min	23,71%	-
Ensaio 04 - 10d.30min.0,13mm/min	5,45%	-
Ensaio 05 - 0d.30min.0,17mm/min	24,54%	32,49%
Ensaio 06 - 1d.30min.0,15mm/min	21,74%	44,90%
Ensaio 07 - 0d.30min.0,14mm/min	27,65%	29,59%
Ensaio 08 - 1d.30min.0,13mm/min	21,25%	24,41%
Ensaio 09 - 0d.30min.0,14mm/min	24,41%	27,88%
Ensaio 10 - 2d.30min.0,13mm/min	17,43%	25,13%

APÊNDICE C

Planilhas dos ensaios realizados no telhado verde com o primeiro simulador

Dados de precipitação das chuvas dos ensaios 11 ao 26:

Ensaio	P1 (mm)	P2 (mm)	P3 (mm)	P4 (mm)	P5 (mm)	Soma (mm)	Média (mm)	Módulo (mm)	Ajuste (mm)
Ensaio 11 - 2d.30min.0,07mm/min	1,5	1,7	2,0	0,5	0,9	6,60	1,32	1,89	2,20
Ensaio 12 - 10d.30min.0,12mm/min	1,7	2,0	2,0	2,0	1,9	9,60	1,92	2,75	3,49
Ensaio 13 - 5d.30min.0,10mm/min	1,5	1,5	1,6	1,9	1,8	8,30	1,66	2,37	2,93
Ensaio 14 - 6d.30min.0,08mm/min	1,0	1,2	1,6		1,7	5,50	1,38	1,97	2,32
Ensaio 15 - 5d.30min.0,22mm/min	3,9	2,8	4,0	4,0	2,0	16,70	3,34	4,78	6,54
Ensaio 16 - 3d.30min.0,15mm/min	2,0	2,1	2,8	3,1	1,8	11,80	2,36	3,37	4,43
Ensaio 17 - 5d.40min.0,41mm/min	12,0	9,5	12,0	14,0	7,0	54,50	10,90	15,59	16,47
Ensaio 18 - 0d.30min.0,40mm/min	8,0	5,0	7,0	11,5	4,0	35,50	7,10	10,15	11,90
Ensaio 19 - 0d.15min.0,34mm/min	3,0	2,7	2,8	3,1	1,7	13,30	2,66	3,80	5,08
Ensaio 20 - 0d.30min.0,43mm/min	9,0	7,9	8,2	9,2	4,9	39,20	7,84	11,21	12,79
Ensaio 21 - 0d.15min.0,33mm/min	3,0	3,0	3,0	2,5	1,5	13,00	2,60	3,72	4,95
Ensaio 22 - 0d.30min.0,38mm/min	8,0	6,0	7,0	7,0	5,0	33,00	6,60	9,44	11,30
Ensaio 23 - 0d.10min.0,51mm/min	2,0	2,8	3,0	3,2	2,4	13,40	2,68	3,83	5,12
Ensaio 24 - 0d.12min.0,57mm/min	2,8	3,6	5,0	4,0	2,0	17,40	3,48	4,98	6,84
Ensaio 25 - 0d.60min.0,33mm/min	15,0	10,0	10,5	18,5	14,5	68,50	13,70	19,59	19,84
Ensaio 26 - 0d.60min.0,31mm/min	13,0	8,0	12,5	25,0	6,0	64,50	12,90	18,45	18,88

Valores de teor de umidade antes e após as chuvas dos ensaios 11 ao 26:

Ensaio	Teor de umidade do substrato antes da chuva	Teor de umidade do substrato após a chuva
Ensaio 11 - 2d.30min.0,07mm/min	18,15%	19,67%
Ensaio 12 - 10d.30min.0,12mm/min	5,68%	11,51%
Ensaio 13 - 5d.30min.0,10mm/min	11,51%	13,56%
Ensaio 14 - 6d.30min.0,08mm/min	9,44%	11,40%
Ensaio 15 - 5d.30min.0,22mm/min	11,40%	16,61%
Ensaio 16 - 3d.30min.0,15mm/min	15,23%	20,79%
Ensaio 17 - 5d.40min.0,41mm/min	11,07%	24,45%
Ensaio 18 - 0d.30min.0,40mm/min	24,45%	29,62%
Ensaio 19 - 0d.15min.0,34mm/min	24,60%	50,32%
Ensaio 20 - 0d.30min.0,43mm/min	50,32%	28,54%
Ensaio 21 - 0d.15min.0,33mm/min	0,2719	0,3701
Ensaio 22 - 0d.30min.0,38mm/min	37,01%	43,07%
Ensaio 23 - 0d.10min.0,51mm/min	26,38%	32,56%
Ensaio 24 - 0d.12min.0,57mm/min	32,56%	-
Ensaio 25 - 0d.60min.0,33mm/min	27,67%	-
Ensaio 26 - 0d.60min.0,31mm/min	28,44%	-

Dados do volume de água escoado acumulado ao longo do tempo dos ensaios 11 ao 18:

Tempo (min)	Volume de água escoado acumulado (L)							
	Ensaio 11	Ensaio 12	Ensaio 13	Ensaio 14	Ensaio 15	Ensaio 16	Ensaio 17	Ensaio 18
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,12
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,34
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,42
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,78
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,98
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,20
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,40
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,42
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,86
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,08
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,34
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,60
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,90
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,10
26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,22
27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,42
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,62
29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,84
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,08
31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	5,32
32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	5,46
33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	5,64
34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	5,76
35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	5,86
36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	5,92
37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	6,00
38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	6,06
39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	6,10

Tempo (min)	Volume de água escoado acumulado (L)							
	Ensaio 11	Ensaio 12	Ensaio 13	Ensaio 14	Ensaio 15	Ensaio 16	Ensaio 17	Ensaio 18
40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	6,10
41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	6,14
42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54	6,16
43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	6,16
44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	6,18
45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	6,20
46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72	6,20
47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	6,20
48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,76	6,20
49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,76	6,20
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,76	6,20
51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,76	6,20
52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,76	6,20
53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	6,20
54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	6,20
55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	6,20
56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	6,20
57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	6,20
58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	6,20
59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	6,20
60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	6,20

Dados do volume de água escoado acumulado ao longo do tempo dos ensaios 19 ao 26:

Tempo (min)	Volume de água escoado acumulado (L)							
	Ensaio 19	Ensaio 20	Ensaio 21	Ensaio 22	Ensaio 23	Ensaio 24	Ensaio 25	Ensaio 26
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,08	0,00	0,04	0,00	0,12	0,00	0,00
4	0,00	0,20	0,00	0,16	0,00	0,32	0,00	0,00
5	0,00	0,36	0,00	0,32	0,00	0,60	0,00	0,00
6	0,00	0,56	0,00	0,50	0,02	0,96	0,00	0,00
7	0,00	0,76	0,00	0,74	0,14	1,26	0,00	0,00
8	0,00	1,00	0,00	0,96	0,40	1,62	0,00	0,00
9	0,02	1,24	0,00	1,20	0,70	2,00	0,00	0,00
10	0,08	1,48	0,00	1,46	1,02	2,40	0,00	0,00
11	0,24	1,74	0,16	1,72	1,34	2,78	0,00	0,00
12	0,40	2,06	0,32	2,02	1,62	3,24	0,02	0,00
13	0,54	2,28	0,52	2,26	1,84	3,60	0,12	0,00

	Volume de água escoado acumulado (L)							
Tempo (min)	Ensaio 19	Ensaio 20	Ensaio 21	Ensaio 22	Ensaio 23	Ensaio 24	Ensaio 25	Ensaio 26
14	0,72	2,54	0,70	2,56	2,02	3,98	0,26	0,00
15	0,92	2,82	0,92	2,84	2,18	4,30	0,42	0,08
16	1,08	3,10	1,12	3,14	2,34	4,56	0,62	0,22
17	1,26	3,38	1,30	3,46	2,48	4,78	0,84	0,38
18	1,42	3,66	1,44	3,76	2,60	5,00	1,06	0,56
19	1,54	3,96	1,56	3,80	2,70	5,14	1,30	0,76
20	1,66	4,26	1,66	4,42	2,78	5,30	1,54	0,96
21	1,78	4,56	1,76	4,78	2,88	5,44	1,80	1,16
22	1,86	4,84	1,84	5,12	2,96	5,56	2,08	1,40
23	1,94	5,16	1,92	5,48	3,02	5,66	2,36	1,62
24	2,02	5,34	1,98	5,84	3,08	5,74	2,62	1,88
25	2,08	5,64	2,04	6,20	3,14	5,82	2,90	2,14
26	2,14	5,92	2,08	6,56	3,18	5,90	3,22	2,40
27	2,20	6,24	2,12	6,94	3,24	5,96	3,50	2,68
28	2,26	6,52	2,16	7,26	3,28	6,02	3,80	2,96
29	2,30	6,82	2,22	7,62	3,34	6,06	4,12	3,28
30	2,34	7,12	2,24	7,98	3,38	6,12	4,44	3,56
31	2,36	7,42	2,28	8,34	3,40	6,16	4,80	3,90
32	2,40	7,68	2,32	8,62	3,44	6,20	5,12	4,20
33	2,42	7,88	2,34	8,86	3,46	6,24	5,44	4,54
34	2,44	7,98	2,36	9,08	3,50	6,28	5,80	4,86
35	2,46	8,08	2,40	9,30	3,52	6,32	6,16	5,22
36	2,48	8,18	2,42	9,44	3,54	6,36	6,50	5,56
37	2,50	8,28	2,44	9,58	3,56	6,40	6,88	5,90
38	2,52	8,40	2,46	9,70	3,58	6,42	7,22	6,24
39	2,54	8,46	2,46	9,80	3,60	6,44	7,58	6,60
40	2,56	8,54	2,48	9,90	3,62	6,46	7,94	6,98
41	2,56	8,60	2,52	9,98	3,64	6,48	8,32	7,36
42	2,58	8,66	2,52	10,06	3,64	6,50	8,68	7,72
43	2,58	8,72	2,52	10,14	3,66	6,52	9,04	8,10
44	2,60	8,78	2,52	10,20	3,68	6,54	9,42	8,46
45	2,60	8,82	2,52	10,26	3,68	6,56	9,78	8,80
46	2,62	8,88	2,54	10,30	3,70	6,58	10,14	9,16
47	2,62	8,90	2,54	10,34	3,70	6,60	10,50	9,52
48	2,62	8,94	2,56	10,38	3,72	6,60	10,88	9,88
49	2,62	8,96	2,56	10,42	3,72	6,62	11,24	10,24
50	2,62	8,98	2,56	10,46	3,72	6,64	11,60	10,60
51	2,62	9,00	2,58	10,50	3,72	6,64	11,96	10,96
52	2,62	9,02	2,58	10,54	3,74	6,66	12,32	11,32
53	2,62	9,04	2,58	10,56	3,74	6,66	12,68	11,68
54	2,62	9,06	2,58	10,58	3,74	6,68	13,04	12,04
55	2,62	9,08	2,58	10,60	3,74	6,68	13,42	12,42

	Volume de água escoado acumulado (L)							
Tempo (min)	Ensaio 19	Ensaio 20	Ensaio 21	Ensaio 22	Ensaio 23	Ensaio 24	Ensaio 25	Ensaio 26
56	2,62	9,10	2,58	10,62	3,74	6,68	13,78	12,80
57	2,62	9,10	2,58	10,64	3,76	6,68	14,16	13,18
58	2,62	9,12	2,58	10,66	3,76	6,70	14,52	13,56
59	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	14,88	13,94
60	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	15,26	14,34
61	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	15,60	14,74
62	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	15,92	15,04
63	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	16,18	15,32
64	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	16,46	15,56
65	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	16,64	15,78
66	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	16,82	15,96
67	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	16,98	16,12
68	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	17,12	16,26
69	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	17,24	16,38
70	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	17,36	16,50
71	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	17,46	16,60
72	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	17,54	16,68
73	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	17,60	16,74
74	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	17,66	16,80
75	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	17,72	16,86
76	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	17,78	16,92
77	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	17,84	16,96
78	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	17,88	17,02
79	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	17,92	17,06
80	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	17,96	17,10
81	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,00	17,14
82	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,02	17,16
83	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,06	17,20
84	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,08	17,24
85	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,12	17,26
86	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,14	17,28
87	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,16	17,30
88	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,18	17,32
89	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,20	17,34
90	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,22	17,36
91	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,24	17,38
92	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,26	17,40
93	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,26	17,42
94	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,28	17,42
95	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,28	17,44
96	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,30	17,44
97	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	0,30	17,46

Tempo (min)	Volume de água escoado acumulado (L)							
	Ensaio 19	Ensaio 20	Ensaio 21	Ensaio 22	Ensaio 23	Ensaio 24	Ensaio 25	Ensaio 26
98	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,32	17,46
99	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,32	17,48
100	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,32	17,48
101	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,34	17,48
102	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,34	17,48
103	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,34	17,48
104	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,34	17,48
105	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,48
106	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
107	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
108	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
109	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
110	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
111	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
112	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
113	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
114	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
115	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
116	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
117	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
118	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
119	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50
120	2,62	9,12	2,58	10,68	3,76	6,70	18,36	17,50

Valores de capacidade de retenção dos ensaios 11 ao 26.

	Capacidade de retenção
Ensaio 11 - 2d.30min.0,07mm/min	100,00%
Ensaio 12 - 10d.30min.0,12mm/min	100,00%
Ensaio 13 - 5d.30min.0,10mm/min	100,00%
Ensaio 14 - 6d.30min.0,08mm/min	100,00%
Ensaio 15 - 5d.30min.0,22mm/min	100,00%
Ensaio 16 - 3d.30min.0,15mm/min	100,00%
Ensaio 17 - 5d.40min.0,41mm/min	95,26%
Ensaio 18 - 0d.30min.0,40mm/min	47,90%
Ensaio 19 - 0d.15min.0,34mm/min	48,41%
Ensaio 20 - 0d.30min.0,43mm/min	28,69%
Ensaio 21 - 0d.15min.0,33mm/min	47,87%
Ensaio 22 - 0d.30min.0,38mm/min	5,47%
Ensaio 23 - 0d.10min.0,51mm/min	26,58%
Ensaio 24 - 0d.12min.0,57mm/min	2,02%
Ensaio 25 - 0d.60min.0,33mm/min	7,45%
Ensaio 26 - 0d.60min.0,31mm/min	7,29%