

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: AMBIENTE CONSTRUÍDO

ADRIANE CORDONI SAVI

**TELHADOS VERDES: UMA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS
ESPÉCIES VEGETAIS NO SEU DESEMPENHO NA CIDADE DE
CURITIBA**

CURITIBA

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: AMBIENTE CONSTRUÍDO

ADRIANE CORDONI SAVI

**TELHADOS VERDES: UMA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS
ESPÉCIES VEGETAIS NO SEU DESEMPENHO NA CIDADE DE
CURITIBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de concentração: Ambiente Construído, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Fernando Tavares

CURITIBA

2015

S267t

Savi, Adriane Cordoni

Telhados verdes : uma análise da influência das espécies vegetais no seu desempenho na cidade de Curitiba/ Adriane Cordoni Savi. – Curitiba, 2015. 176, [39] f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, 2015.

Orientador: Sergio Fernando Tavares .

Bibliografia: p. 154-159.

1. Telhados - Aspectos ambientais. 2. Telhados - Propriedades térmicas. 3. Plantas - Adaptação. 4. Solos- Permeabilidade. 5. Água - Qualidade. I. Universidade Federal do Paraná. II.Tavares, Sergio Fernando. III. Título.

CDD: 635.9671

FOLHA DE APROVAÇÃO

ADRIANE CORDONI SAVI

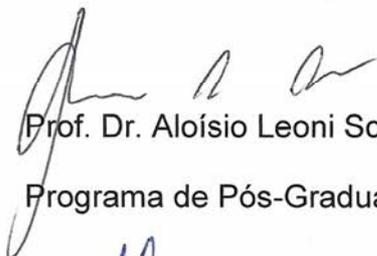
TELHADOS VERDES: UMA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS ESPÉCIES VEGETAIS NO SEU DESEMPENHO NA CIDADE DE CURITIBA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, pela Banca examinadora formada pelos professores:



Prof. Dr. Sergio Fernando Tavares (Orientador)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR.



Prof. Dr. Aloísio Leoni Schmid

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR.



Prof. Dr. George Stanescu

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR



Prof. Dr. Eloy Fassi Casagrande Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - DACOC

Curitiba, 08 de junho de 2015

AGRADECIMENTOS

A viabilidade dessa pesquisa não seria possível sem alguns agentes que contribuíram de forma direta para a sua realização. Algumas empresas e pessoas acreditaram no potencial da pesquisa e desta forma auxiliaram com doações para viabilizar economicamente a construção do protótipo.

Desta forma, gostaria de agradecer primeiramente ao horto municipal de Curitiba, na pessoa do engenheiro agrônomo Daniel Salvador Schlichta, que cedeu o espaço para a instalação do protótipo de telhado verde.

À Eneida Hoffmann pela doação das madeiras. À LCC Construções pela doação de material e mão de obra para a base do sistema. À Global Wood Brasil pela doação das chapas de compensado estruturado. Às empresas Impertech que forneceu a borracha líquida para impermeabilização, À Guter Instalação pela manta PEAD e À Diprotec pela doação da manta geotêxtil.

Agradeço também ao Labeam, na pessoa da Luciane Prado, por abrir as portas do laboratório para a realização dos testes de qualidade da água.

Gostaria de agradecer aos alunos de arquitetura: Maria Isabel Reis, Rafael Vaz e Giani Leguizamon, pela contribuição na construção e medições necessárias.

À amiga, arquiteta e mestre Ana Priscilla Muller, que dividiu comigo essa tarefa de construir o protótipo.

Ao meu orientador Sergio Tavares, que já sonhava com a realização dessa pesquisa e contribuiu de todas as formas para a sua viabilidade e por todas as suas contribuições para meu crescimento como pesquisadora.

Aos colegas de mestrado pelas contribuições e pelo crescimento juntos.

Agradeço à minha família, Marcia Savi, Francisco Savi e Andressa Savi pela paciência, compreensão e dedicação nesse processo, que quando necessário ajudaram na realização da construção e das medições da pesquisa.

Ao Raphael Travenssoli pelas revisões necessárias.

Especialmente ao Ormy Júnior pelo companheirismo nesse processo, me apoiando em todas as minhas decisões, me dando suporte nas horas difíceis e trabalhando junto sempre que necessário.

E por fim agradeço ao Ian Matias, que teve a minha ausência alguns dias para que eu pudesse finalizar a pesquisa.

RESUMO

Estudos ressaltam os benefícios que os telhados verdes podem proporcionar para as cidades e para as edificações, entretanto, pode-se perceber uma variação entre os resultados alcançados. Desta forma, este trabalho busca avaliar a influência das espécies vegetais no desempenho dos telhados verdes na cidade de Curitiba, através da análise de temperatura superficial, retenção de água da chuva e qualidade da água escoada, em cinco protótipos de telhados verdes e três protótipos de coberturas convencionais (laje impermeabilizada - com estrutura em chapa de compensado, telhado em fibrocimento, telhado cerâmico), como objetos de comparação. Para essa análise foram escolhidas cinco espécies vegetais com características morfológicas diferentes, entre elas: *Bulbine frutescens*, *Tradescantia zebrina*, *Arachis repens*, *Sedum mexicanum*, *Callisia repens*. A espécie *Arachis repens* não resistiu ao período de inverno sendo substituída pela espécie *Zoysia tenuifolia*. As coberturas foram montadas em uma mesa de testes com módulos de 75cmx100cm para simular os sistemas de cobertura. A temperatura superficial foi registrada através de termopares tipo K conectados a um *datalogger* (TD890). Foram realizadas cinco coletas de dados (período médio de 48 horas) com registros a cada 10 minutos. Os resultados demonstraram que existe uma variação significativa de temperatura superficial entre as espécies vegetais analisadas, mas todas apresentaram um desempenho superior aos sistemas convencionais de cobertura. Quanto à temperatura superficial superior (sobre o substrato), a espécie *Zoysia tenuifolia* apresentou as temperaturas mais elevadas no período diurno e mais baixas no período noturno, quando comparado com os demais sistemas de telhado verde, com temperaturas próximas à da laje impermeabilizada. Já a espécie *Bulbine frutescens* apresentou temperatura mais baixa durante o dia e as mais elevadas durante a noite. Quanto à temperatura superficial inferior dos sistemas de telhado verde, as temperaturas mais elevadas durante o dia foram registradas na espécie *Bulbine frutescens*, entretanto, mesmo assim, com temperatura média 10°C abaixo dos sistemas de cobertura convencional. No período noturno o registro mais alto de temperatura dos sistemas de telhado verde foi da espécie *Zoysia tenuifolia*, entretanto todas as espécies apresentaram temperatura superior às coberturas convencionais. Para a análise de retenção de água foram observados o escoamento da água dos sistemas de telhado verde e da laje impermeabilizada (utilizada como pluviômetro no presente experimento) de junho de 2014 a janeiro de 2015. A variação de retenção da água pelas espécies vegetais foi significativa e podem ser explicadas pela tipologia das plantas e pelo fechamento que as plantas proporcionam no solo. A maior retenção observada foi por plantas que, em sua morfologia, absorvem mais água e a retêm em suas folhas e raízes, espécies que proporcionaram um menor fechamento do solo também retiveram mais água que as demais. A espécie com a maior retenção foi a *Bulbine frutescens* seguida do *Sedum mexicanum*. A análise da qualidade da água escoada pelas coberturas foi feita através dos parâmetros: pH, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, fósforo total, coloração e sólidos totais, com coletas feitas em dia posterior ao registro de precipitação. A bibliografia destaca que esses parâmetros são os que sofrem a maior variação quando a água é escoada por um sistema de telhado verde. Essa pesquisa corroborou com a bibliografia, demonstrando que a presença de fósforo e nitrogênio é superior nesse tipo de cobertura, sendo associada à adubação. A coloração da água que escoava pelo telhado verde também apresentou tom ferroso intenso, superior aos valores máximos previstos na legislação e superior a da água escoada pelos sistemas tradicionais. A quantidade de sólidos presentes e pH ficaram dentro dos parâmetros previstos pela legislação, tanto para os telhados verdes quanto para os telhados convencionais.

Palavras chave: telhado verde, espécies vegetais, desempenho térmico, retenção de água, qualidade da água, sustentabilidade.

ABSTRACT

Researches highlight the benefits brought by the adoption of green roofs to the cities and buildings, however it's noticeable a variation on the obtained results, reason that encouraged this research, which assesses how the vegetation species influences on the green roof performance in the city of Curitiba by analyzing the surface temperature, how much rain water is retained and its quality, five green roof prototypes were used along with three regular roof (waterproof slab, fiber cement roofing, ceramic roof tiles) prototypes to provide comparison parameters. The following five vegetation species were chosen, all with different morphological characteristics: *Bulbine frutescens*, *Tradescantia zebrina*, *Arachis repens*, *Sedum mexicanum*, *Callisia repens*. The species *Arachis repens* did not resist to the winter and had to be replaced by the *Zoysia tenuifolia*. The roofs were assembled in modules on a testing table, each one measuring 75x100cm, simulating the roof systems. The surface temperature was measured using a type K thermocouple and recorded using a TD890 datalogger, five data collection were held (average of 48 hours period) and records every ten minutes. The results showed that there is a significant variation between the vegetation species. Analyzing the superior surface temperature (above the substratum), the specie *Zoysia tenuifolia* had the highest temperatures during daytime and the lowest at night, temperatures close to the slab, the specie *Bulbine frutescens* had the lowest records during the day and the highest at night. For the inferior surface temperature, the highest records were with the *Bulbine frutescens*, still below regular roofs (up to 10°C) while at night the highest temperatures recorded was with the specie *Zoysia tenuifolia*, however, all species recorded higher temperatures than conventional roofs. To analyze the water retention was recorded the amount of rain water that flew thru the slab (used as a pluviometer in this experiments) and the green roofs between June 2014 and January 2015, the retention variation among the species was significant and can be explained by the plants' typologies and how much of the soil they cover. The highest retention observed was by the plants which its morphology absorbers more water and retain on its leafs and roots, species that don't cover much soil did retain more water than others. The specie with the highest retention was the *Bulbine frutescens* followed by the *Sedum mexicanum*. The water flown quality analysis was done by analyzing the following parameters: pH level, total nitrogen, ammoniacal nitrogen, total phosphorus, color and total solids, with records being made in the following day of the rain. The bibliography highlights that those parameters are the ones that show the biggest variations when the water flows thru a green roof system. This research corroborates with the bibliography, demonstrating that the phosphorus and nitrogen presence is higher when using this type of roof, related to the fertilization. The coloring of the water that flew thru the green roofs had an intense ferrous shade, above the limits foreseen by legislation and higher than the water that flew thru regular roofs system. The amount of solids present and the pH was within the limits foreseen by legislation for both roof methods.

Keywords: green roof, vegetation species, thermal performance, rainwater retention, water quality, sustainability.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| figura 1 - Proporção da população urbana e rural no Brasil | 13 |
| figura 2 -Telhado verde com inclinação de 45° - Siegen Oberscheiden (Alemanha) 18 | 18 |
| figura 3 - Telhado Plano - Albergue em Stuttgart Hohenheim (Alemanha) | 18 |
| figura 4 - Camadas Telhado verde Intensivo..... | 19 |
| figura 5 - Exemplo de telhado verde de uso intensivo - Houston, USA..... | 19 |
| figura 6 - Exemplo de telhado verde de uso intensivo – Beloit, USA..... | 19 |
| figura 7- Exemplo de cobertura de uso Extensivo - Chicago – USA | 20 |
| figura 8 - Exemplo de cobertura de uso Extensivo - Chicago USA | 20 |
| figura 9 - Camadas telhado verde Extensivo..... | 20 |
| figura 10 - Composição telhado verde..... | 22 |
| figura 11 - Drenagem com Argila expandida, sem retenção de água..... | 24 |
| figura 12 - Comparativo contendo os valores da temperatura interna do ar (altura 1 metro do piso); temperatura superficial do forro e temperatura externa do ar nas horas do dia..... | 29 |
| figura 13 - Comparativo das temperaturas superficiais internas de cinco protótipos: 1.) aço galvanizado; 2.) fibrocimento ondulada; 3.) laje pré-moldada cerâmica inclinada (sem telhas) e com impermeabilização, de cor branca, com resina de óleo vegetal (<i>Ricinus communis</i>); 4.)cobertura verde leve e, finalmente; 5.) telha cerâmica..... | 29 |
| figura 14 - Temperaturas medidas ao longo do tempo em diferentes superfícies de coberturas planas em um dia ensolarado de verão..... | 31 |
| figura 15 - Composição das três coberturas: Plot A: Cobertura de controle (tradicional); Plot B, telhado verde com a espécie <i>Sedum</i> ; Plot C: telhado verde com Grama Amendoim. | 39 |
| figura 16 - Fluxo de calor diurno através do telhado em Parcelas A, B e C por dois dias mais frios nomeadamente adicionais para: (a) Dia de inverno nublado, e (b) dia chuvoso de inverno. A temperatura é, em °C e precipitação em mm..... | 40 |
| figura 17 - Fluxo de calor diurno através do telhado em Parcelas A, B e C para três cenários climáticos: (a) dia de inverno ensolarado, (b) dia de inverno nublado e (c) dia chuvoso de inverno. A temperatura é, em °C e precipitação em mm..... | 41 |
| figura 18 - Análise dos efeitos térmico com imagem do infravermelho térmico; (a) nove tipos de espécies vegetais; (b) <i>Bryophyllum pinnatum</i> com diferentes alturas; (c) <i>Ipomoea batata</i> com diferentes cores das folhas..... | 46 |
| figura 19 - Variação de temperatura versus o tempo na superfície das folhas para:(a) nove tipos de espécies vegetais; (b) <i>Bryophyl lumpinnatum</i> com diferentes alturas; (c) <i>Ipomoea batata</i> com diferentes cores das folhas..... | 48 |
| figura 20 - Dias em crescimento normal das plantas no experimento de tolerância a seca..... | 50 |
| figura 21 - Exemplo de escoamento de um telhado verde (linha tracejada) gerado por um dado evento de chuva (linha preta). | 52 |
| figura 22 - Visão geral do processo básico de produtos nos sistemas de coberturas alternativas. O diagrama de fluxo descreve o fluxo básico de energia, emissões e | |

| | |
|--|----|
| materiais. As setas pretas representam casos em que um modo de transporte serão utilizados. | 59 |
| figura 23 - Resultados individuais para os três tipos de coberturas | 60 |
| figura 24 - Horto Municipal de Curitiba | 68 |
| figura 25 - Local de Inserção da mesa de testes..... | 68 |
| figura 26 - Perspectiva do protótipo..... | 68 |
| figura 27 - Perspectiva do protótipo..... | 69 |
| figura 28 - Perspectiva do protótipo..... | 69 |
| figura 29 - Perspectiva do protótipo..... | 69 |
| figura 30 - Perspectiva do protótipo..... | 70 |
| figura 31 - Corte do protótipo..... | 70 |
| figura 32 - Mesa de teste de telhados, demonstrado a inclinação prevista para os módulos..... | 71 |
| figura 33 - Sistema de Captação de água da Chuva..... | 71 |
| figura 34 - Instalação dos pilares em madeira nas sapatas de concreto..... | 72 |
| figura 35 - Identificação das vigas e pilares conforme projeto..... | 72 |
| figura 36 - limpeza e identificação das vigas e pilares | 72 |
| figura 37 - Corte das madeiras conforme projeto | 73 |
| figura 38 - Corte das madeiras conforme projeto | 73 |
| figura 39 - Chapa de compensado de <i>pinus</i> naval | 73 |
| figura 40 - Chapas de Compensado cortadas de fábrica | 74 |
| figura 41 - Montagem da mesa de testes | 74 |
| figura 42 - Fixação da estrutura lateral dos módulos..... | 74 |
| figura 43 - Selador de borda..... | 75 |
| figura 44 - Bordas seladas e EPS colocado | 75 |
| figura 45 - Sistema de drenagem dos módulos | 76 |
| figura 46 - Instalação do sistema de coleta de água da chuva..... | 76 |
| figura 47 - Composto para fechar frestas | 77 |
| figura 48 - Vedação nos encaixes das caixas | 77 |
| figura 49 - Impermeabilização fundo do protótipo | 77 |
| figura 50 - Impermeabilização laterais do protótipo..... | 77 |
| figura 51 - Manta de PEAD - camada antirraízes | 78 |
| figura 52 - Camada de drenagem com 4 cm de espessura..... | 78 |
| figura 53 - Colocação de argila expandida nos módulos de telhado verde | 78 |
| figura 54 - Colocação da manta geotêxtil | 79 |
| figura 55 - Argila expandida, vermiculita, turfa e casca de arroz carbonizada..... | 80 |
| figura 56 - Colocação de substrato no módulo de telhado verde | 80 |
| figura 57 - <i>Bulbine frutescens</i> | 81 |
| figura 58 - <i>Bulbine frúticis</i> | 81 |
| figura 59 - <i>Tradescantia zebrina</i> variação <i>Purpusii</i> | 82 |
| figura 60 - <i>Tradescantia zebrina</i> variação <i>Purpusii</i> | 82 |
| figura 61 - <i>Arachis repens</i> | 83 |

| | |
|---|-----|
| figura 62 - <i>Arachis repens</i> | 83 |
| figura 63 - <i>Sedum mexicanum</i> | 83 |
| figura 64 - <i>Sedum mexicanum</i> | 83 |
| figura 65 - <i>Callisia repens</i> | 84 |
| figura 66 - <i>Callisia repens</i> | 84 |
| figura 67 - Dia do plantio das mudas 10/02/2014 | 85 |
| figura 68 - Dia do plantio das mudas 10/02/2014 | 86 |
| figura 69 - Módulo impermeabilizado - pluviômetro | 87 |
| figura 70 - fixação de chapa de compensado..... | 88 |
| figura 71 - fixação de caibros e ripas para sustentação das telhas cerâmicas..... | 88 |
| figura 72 - módulo de telhado cerâmico | 88 |
| figura 73 - Detalhe do ralo, módulo telhado de fibrocimento | 89 |
| figura 74 - Fixação de caibro para apoio da telha de fibrocimento | 89 |
| figura 75 - Módulo com cobertura de telha de fibrocimento | 89 |
| figura 76 - Mesa de testes para experimento | 90 |
| figura 77 - coletor transparente graduado | 91 |
| figura 78 - coletores de água da chuva instalados | 91 |
| figura 79 - <i>Datalogger</i> TD-90 com termopares do tipo K..... | 92 |
| figura 80 - medição com <i>datalogger</i> TD-890 e termopares do tipo | 92 |
| figura 81 - HT-4000 - termo-higrômetro <i>datalogger</i> | 92 |
| figura 82 - sensor instalado para medição superficial superior..... | 93 |
| figura 83 - sensor instalado para medição superficial inferior..... | 93 |
| figura 84 - HT-4000 fixado na estrutura de madeira..... | 94 |
| figura 85 - caixa de correio para a locação dos <i>dataloggers</i> | 94 |
| figura 86 - pHmetro de bancada..... | 95 |
| figura 87 - medição de pH através do pHmetro de bancada | 95 |
| figura 88 - Membrana para filtragem da água | 96 |
| figura 89 - Sistema de filtragem da água a vácuo | 96 |
| figura 90 - Membrana para filtragem da água | 96 |
| figura 91 - Estufa para secagem das membranas..... | 96 |
| figura 92 - Espectrofotômetro UV-Vis..... | 97 |
| figura 93 - Curva de calibração Fósforo | 97 |
| figura 94 - Curva de calibração do nitrogênio amoniacal | 98 |
| figura 95 - Redução pela coluna Cd-Cu | 99 |
| figura 96 - Amostras para curva de calibração (500 ao 0)..... | 99 |
| figura 97 - Leitura de cor NQ200 | 99 |
| figura 98 - Ao lado esquerdo o branco (água destilada) lado direito a amostra. | 99 |
| figura 99 - Gráfico pluviométrico mês de outubro de 2014..... | 104 |
| figura 100 - Desenvolvimento das vegetações entre os meses de fevereiro e julho de 2014 | 105 |
| figura 101 - Desenvolvimento das vegetações entre os meses de julho de 2014 a fevereiro de 2015. | 106 |

| | |
|---|-----|
| figura 102 - escoamento de água de chuva em milímetros - eventos 1 ao 4..... | 109 |
| figura 103 - escoamento de água de chuva em milímetros - eventos 11 ao 13..... | 110 |
| figura 104 - escoamento de água de chuva em milímetros - eventos 5 ao 12..... | 112 |
| figura 105 - Sensor tipo K temperatura superficial superior. | 115 |
| figura 106 - Sensor tipo K temperatura superficial inferior. | 115 |
| figura 107 - <i>Datalogger</i> HT - 4000 - temperatura e umidade do ar..... | 115 |
| figura 108 - Gráfico de temperatura superficial dos dias 07 a 09/10/2014 | 116 |
| figura 109 - Gráfico de temperatura superficial superior dos dias 08 e 09/10/2014 | 117 |
| figura 110 - Gráfico representado a diferença entre a temperatura superior e a temperatura do ar - ($\Delta t = \text{tempSup} - \text{TempAr}$) dos sistemas de telhado verde e laje 08 e 09/10/2014 | 118 |
| figura 111 - Gráfico de temperatura superficial inferior dias 08 e 09/10/2014 | 120 |
| figura 112 - Gráfico representado a diferença entre a temperatura inferior e a temperatura do ar..... | 121 |
| figura 113 - Gráfico temperatura superior e inferior da <i>Bulbine</i> e <i>Tradescantia</i> e temperatura do ar 08 e 09/10/2014 | 122 |
| figura 114 - Módulo telhado verde espécie <i>Bulbine frutescens</i> 07/10/2014 | 123 |
| figura 115 - Módulo telhado verde espécie <i>Tradescantia zebrina</i> 07/10/2014 | 123 |
| figura 116 - Gráfico de temperatura superficial inferior dia 07/11/2014..... | 124 |
| figura 117 - Gráfico de temperatura superficial inferior dia 09/11/2014..... | 125 |
| figura 118 - Gráfico de temperatura superficial dia 07 a 09/01/2015..... | 127 |
| figura 119 - Gráfico de temperatura superficial superior dias 07 e 08/01/2015 | 128 |
| figura 120 - Gráfico representado a diferença entre a temperatura superior e a temperatura do ar - ($\Delta t = \text{tempSup} - \text{TempAr}$) dos sistemas de telhado verde e laje 07 e 08/01/2015 | 129 |
| figura 121 - Sensor sobre o sistema de telhado verde com a espécie <i>Zoysia tenuifolia</i> | 130 |
| figura 122 - Gráfico de temperatura superficial inferior dias 07 e 08/01/2015..... | 131 |
| figura 123 - Gráfico representado a diferença entre a temperatura superior e a temperatura do ar - ($\Delta t = \text{tempInf} - \text{TempAr}$) dos sistemas de telhado verde e laje - 07 e 08/01/2015 | 132 |
| figura 124 - Gráfico de temperatura superficial superior e inferior: <i>Bulbine frutescens</i> , <i>Zoysia tenuifolia</i> e temperatura do ar dias 07 e 08/01/2015..... | 133 |
| figura 125 - Gráfico de temperatura superficial dia 09 a 10/04/2015..... | 135 |
| figura 126 - Gráfico de temperatura superficial superior dia 09 a 10/04/2015..... | 136 |
| figura 127 - Gráfico da diferença entre a temperatura superior e a temperatura do ar | 137 |
| figura 128 - Gráfico de temperatura superficial inferior dia 09 e 10/04/2015..... | 138 |
| figura 129 - Gráfico da diferença entre a temperatura inferior e a temperatura do ar | 139 |
| figura 130 - Membranas após filtragem dos sólidos totais presentes na água..... | 145 |
| figura 131 - Amostras de água coletadas dos módulos..... | 146 |
| figura 132 - Hierarquia entre os sistemas de telhados quanto a temperatura superficial superior | 151 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| tabela 1 - Análise comparativa entre três sistemas distintos de cobertura (laje impermeabilizada, telha cerâmica, telhado verde) e simulação através de software. | 32 |
| tabela 2 - Água da chuva retida em telhados verdes | 53 |
| tabela 3 - Concentração de nutrientes no escoamento de água da chuva em telhados verdes | 55 |
| tabela 4 - Normais climatológicas Curitiba (1961 - 1990)..... | 67 |
| tabela 5 - Classificação do uso de águas segundo Resolução Conama 357/2005 (BRASIL, 2005) | 100 |
| tabela 6 - Parâmetros adotados pela legislação quanto a qualidade da água | 101 |
| tabela 7 - Precipitação 2014/2015 e Precipitação média de 1961 a 1990..... | 107 |
| tabela 8 - tabela de retenção de água da chuva nos meses de junho de 2014 a janeiro de 2015..... | 108 |
| tabela 9 - retenção da água da chuva - eventos 1 ao 4 | 109 |
| tabela 10 - tabela de retenção de água da chuva no mês de janeiro de 2015 | 110 |
| tabela 11 - tabela de retenção de água da chuva meses de junho e julho..... | 112 |
| tabela 12 - Condições climáticas, conforme dados INMET | 114 |
| tabela 13 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais superiores dos módulos 08 e 09/10/2014 (Dados: Apêndice B)..... | 119 |
| tabela 14 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais inferiores dos módulos 08 e 09/10/2014 | 121 |
| tabela 15 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais inferiores 07/11/2014 | 124 |
| tabela 16 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais inferiores 09/11/2014 | 125 |
| tabela 17 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais superiores dos módulos 08 e 09/10/2014 | 130 |
| tabela 18 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais inferiores dos módulos 07 e 08/01/2015 | 133 |
| tabela 19 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais superiores - 09 e 10/04/2015 | 137 |
| tabela 20 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais inferiores - 09 e 10/04/2015 | 139 |
| tabela 21 - Análise dos diferentes parâmetros de qualidade da água entre os sistemas de cobertura e a legislação vigente (Dados: Apêndice G) | 143 |
| tabela 22 - Modelo para anotação das informações coletadas nos protótipos em dia posterior a precipitação | 167 |
| tabela 23 - Tabela de coleta de dados de temperatura | 168 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA..... | 14 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 15 |
| 1.3 HIPÓTESE..... | 15 |
| 1.4 CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA | 16 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 18 |
| 2.1 TELHADO VERDE: TIPOLOGIA | 18 |
| 2.1.1 Telhados verdes: intensivo e extensivo..... | 18 |
| 2.2 COMPOSIÇÃO E TÉCNICAS DE TELHADO VERDE..... | 21 |
| 2.2.1 Estrutura..... | 22 |
| 2.2.2 Impermeabilização | 23 |
| 2.2.3 Membrana antirraiz | 23 |
| 2.2.4 Camada de drenagem..... | 24 |
| 2.2.5 Separação substrato | 24 |
| 2.2.6 Substrato..... | 25 |
| 2.2.7 Vegetação | 26 |
| 2.3 TELHADO VERDE: BENEFÍCIOS | 27 |
| 2.3.1 Isolamento térmico, conservação de energia e proteção da edificação quanto aos raios solares | 28 |
| 2.3.2 Redução das ilhas de calor e da amplitude térmica..... | 30 |
| 2.3.3 Sistemas de drenagem mais eficazes..... | 31 |
| 2.3.4 Produção de oxigênio, absorção de CO ₂ e filtragem do ar | 32 |
| 2.4 ESTADO DA ARTE..... | 33 |
| 2.4.1 Artigo 01 | 33 |
| 2.4.2 Artigo 02..... | 37 |
| 2.4.3 Artigo 03..... | 44 |
| 2.4.4 Artigo 04..... | 51 |
| 2.4.5 Artigo 05..... | 58 |
| 3 MÉTODO DE PESQUISA..... | 61 |
| 3.1 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA (MÉTODO) DE PESQUISA..... | 61 |
| 3.1.1 Unidade de análise..... | 61 |
| 3.1.2 Delimitação do trabalho..... | 61 |
| 3.1.3 Justificativa da escolha a partir do objetivo | 63 |
| 3.1.4 Testes de validade | 63 |
| 3.1.4.1 Validade do constructo..... | 63 |
| 3.1.4.2 Validade interna | 64 |
| 3.1.4.3 Validade externa | 64 |
| 3.1.4.4 Rastreabilidade | 65 |
| 3.2 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS | 65 |

| | |
|---|------------|
| 3.3 EXPERIMENTO - CAMA DE TESTES..... | 66 |
| 3.3.1 Localização | 66 |
| 3.3.2 Projeto da cama de testes..... | 68 |
| 3.3.3 Montagem da mesa de testes | 71 |
| 3.3.4 Montagem dos módulos de telhado verde | 77 |
| 3.3.5 Montagem dos módulos de coberturas tradicionais | 87 |
| 3.4 MÉTODO DE ANÁLISE DE DADOS..... | 90 |
| 4 RESULTADOS | 102 |
| 4.1 DESENVOLVIMENTO DAS ESPÉCIES | 102 |
| 4.1 RETENÇÃO DE ÁGUA DA CHUVA..... | 107 |
| 4.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉRMICO | 113 |
| 4.2.1 Evento 01: 07 a 09 de outubro de 2014 | 115 |
| 4.2.2 Evento 02: 07 a 10 de novembro de 2014 | 123 |
| 4.2.3 Evento 03: 07 a 09 de janeiro de 2014..... | 126 |
| 4.2.4 Evento 05: 09 e 10 de abril de 2014..... | 134 |
| 4.3 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA | 140 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 148 |
| 5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS | 153 |
| REFERÊNCIAS..... | 154 |
| APÊNDICE A | 160 |
| APÊNDICE B | 167 |
| APÊNDICE C | 168 |
| APÊNDICE D | 169 |
| APÊNDICE E | 170 |
| ANEXO A..... | 176 |

1 INTRODUÇÃO

O aglomerado urbano tem crescido de forma exponencial. No início do século, a população urbana representava 15% da população mundial e atualmente representa 54%, sendo que, no Brasil, a população em áreas urbanas ultrapassa 85%, conforme figura 1 (ONU, 2014). Com o desenvolvimento urbano das cidades aumenta-se as superfícies impermeabilizadas, tais como ruas, calçadas e telhados, o que acarreta em consequências para a cidade e para o meio ambiente, a redução da infiltração natural das águas pluviais e aumento das inundações (TUCCI, 2015). Além disso, estudos indicam que com o aquecimento global pode causar aumento da frequência e da intensidade de precipitações (BERNDTSSON, 2010).

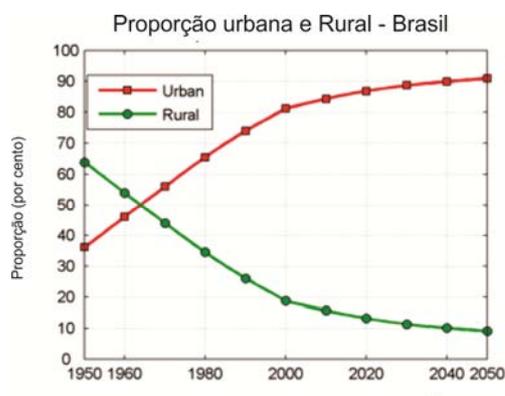


figura 1 - Proporção da população urbana e rural no Brasil
 Fonte: ONU (2014)

O aumento da urbanização nos anos 60 até os dias atuais, juntamente com a arquitetura contemporânea que se afastou da preocupação ambiental, tem ajudado a agravar os problemas nos centros urbanos. Corbella e Yannas (2003) afirmam que após a II Guerra Mundial, com o combustível abundante e barato, os projetos arquitetônicos se afastaram da arquitetura bioclimática e foram adotadas soluções com maior consumo energético; entretanto, depois da primeira crise energética que impulsionou o aumento dos preços do petróleo em 1973, voltou-se a se preocupar com uma arquitetura denominada arquitetura bioclimática o que, segundo os autores, resultou no renascimento de uma arquitetura preocupada com o consumo energético e com a integração ao clima local. "A arquitetura sustentável é a continuidade mais natural da bioclimática, considerando também a integração do edifício à totalidade do meio ambiente, de forma a torná-lo parte de um conjunto maior" (CORBELLA e YANNAS,2003).

Nesse cenário, a necessidade de fomentar o uso de técnicas que auxiliem a mitigar os problemas de consumo energético elevado nas edificações e recorrência de inundações nos centros urbanos, os telhados verdes podem assumir um papel importante.

Alguns pesquisadores, como Berndtsson (2010), Kosareo e Ries (2007) e Saadatian *et al.*(2013), têm estudado diferentes variáveis dos telhados verdes, como desempenho térmico, consumo energético, capacidade de fixação de carbono, capacidade de retenção de água de chuva, entre outros, e seus resultados convergem positivamente na aplicação dos telhados verdes como forma de melhorar o desempenho das edificações.

Entretanto, poucos estudos analisam a variação do desempenho das edificações pelo tipo de vegetação utilizada nos telhados verdes. Desta forma, esta pesquisa, através de uma análise experimental, buscará verificar as diferentes propriedades das espécies vegetais, principalmente quanto ao seu desempenho térmico, à capacidade de retenção de água e à capacidade de filtrar as impurezas da água da chuva. O desempenho será avaliado através do método comparativo entre os diferentes sistemas de coberturas verdes e os sistemas tradicionais de cobertura utilizados no Brasil, verificando o comportamento de cada um.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A discussão em torno da temática de telhados verdes é muito atual e frequente. Cidades do Brasil tem abordado a temática por meio de projetos de lei que fomentam o uso de telhados verdes em novas edificações, como: Rio de Janeiro, através da Lei 6.349/2012; Recife, com a aprovação do projeto de lei 67/2013 em dezembro de 2014; e Curitiba, com o projeto de Lei n.º 005.00006.2013, que tramita na câmara de vereadores e tem como objetivos diminuir as ilhas de calor, absorver o escoamento superficial, reduzir a demanda de ar condicionado, reduzir as emissões dos gases do efeito estufa com a transformação do dióxido de carbono (CO₂) em oxigênio (O₂) pela fotossíntese e melhoria do micro clima através da redução da temperatura superficial da cobertura e consequente atenuação do efeito das ilhas de calor em centros urbanos.

Niachou *et al.* (2001) ressaltam ainda que o tipo de vegetação influi diretamente no desempenho térmico e na absorção de energia de uma cobertura. Os resultados obtidos pelos autores demonstram que espécies vegetais com coloração mais escura apresentam temperatura superficial mais elevada.

Desta forma, surge o problema dessa pesquisa:

Qual a influência das espécies vegetais no desempenho dos telhados verdes, na cidade de Curitiba, quanto aos parâmetros de temperatura superficial, retenção da água da chuva e qualidade da água escoada e quais se adaptam às condições climáticas da cidade?

1.2 OBJETIVOS

Avaliar a influência de diferentes espécies vegetais no desempenho dos telhados verdes comparando com sistemas tradicionais de cobertura, telha de barro, telha de fibrocimento e estrutura impermeabilizada, na cidade de Curitiba.

1.3 HIPÓTESE

Acredita-se que o tipo de vegetação utilizada em coberturas verdes pode influenciar diretamente na temperatura interna do ar de uma edificação. Niachou *et al.* (2001) afirmam que a vegetação de cor escura apresenta maior temperatura superficial que a vegetação roxa ou vermelha e afirma ainda que o cobrimento do solo pela vegetação influencia o desempenho da cobertura: solos mais expostos aquecem o substrato e aumentam a temperatura interna em climas quentes.

Saadatian *et al.* (2013) destacam que o desempenho de um telhado verde pode alterar em função da sua composição, ou seja, dos elementos e camadas que compõem cada cobertura. Assim, desta forma, destacam os autores, a troca das espécies vegetais pode influenciar no desempenho da cobertura. Liu *et al.* (2012) corroboram esta informação e destacam que a diferença morfológica das espécies vegetais influenciam no seu desempenho. Como resultado de suas pesquisas, demonstraram que a mesma espécie vegetal, mas com diferentes alturas, apresentou resultados diferentes, sendo que quanto mais alta a planta mais baixa a

temperatura. Os autores destacam ainda a influência da coloração das folhas no desempenho, sendo que o resultado apresenta resultado similar ao apresentado por Niachou *et al.* (2001).

1.4 CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA

A linha de pesquisa, telhados verdes, vem sendo abordada e discutida dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil (PPGECC) na Universidade Federal do Paraná (UFPR), na área de concentração: Ambiente Construído.

Inicialmente Nascimento (2008) aprofundou o tema através de uma pesquisa do tipo *survey* analisando as coberturas verdes no contexto da região metropolitana de Curitiba, com foco nas barreiras e potencialidades. Nascimento (2008) caracterizou a história das coberturas verdes no mundo, ressaltando ainda o processo de aprimoramento tecnológico das coberturas verdes e os benefícios desse sistema. Através da aplicação de um *survey* com profissionais da área de Arquitetura e Engenharia, buscou entender a dificuldade da disseminação das coberturas verdes no recorte acima citado.

Baldessar (2011) busca uma nova abordagem quanto à linha de pesquisa sobre telhados verdes, aprofundando seu estudo na contribuição das coberturas verdes na redução de vazão de água de chuva escoada. Por meio de uma pesquisa experimental, a autora analisa o escoamento de água de chuva de três modelos distintos de cobertura: laje impermeabilizada, telha cerâmica e cobertura verde, confrontando os dados com o *software greenroof*. A autora comprova, dessa forma, o benefício do telhado verde no processo de gestão de águas pluviais, com capacidade média de retenção de água da chuva de 70%.

Muller (2014), em sua pesquisa, verificou a influência do substrato na capacidade de retenção de água de chuva e no desenvolvimento das vegetações através da análise de cinco composições distintas de substrato, mostrando, a partir desse estudo, como os componentes do telhado verde influenciam no desempenho da cobertura.

Nessa mesma linha, a presente pesquisa vem contribuir com novos dados a respeito das coberturas verdes, através de experimentos que demonstrem o

comportamento das espécies vegetais em telhados verdes quanto a sua capacidade de desenvolvimento, quanto a temperatura superficial, a retenção de água da chuva e a qualidade da água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TELHADO VERDE: TIPOLOGIA

Telhado verde corresponde à técnica de aplicação de substrato e vegetação sobre uma camada impermeável com a função de cobertura de uma determinada edificação, que pode ser inclinado (figura 2) ou plano (figura 3). Pode ser denominado como cobertura verde, telhado vivo, telhado jardim, teto verde, jardim suspenso, entre outros. Ao longo da pesquisa será adotado o termo telhado verde.



**figura 2 -Telhado verde com inclinação de 45º
- Siegen Oberscheiden (Alemanha)
Fonte: MINKE (2005)**

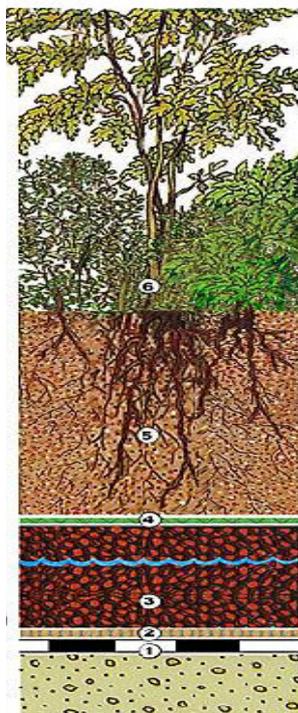


**figura 3 - Telhado Plano - Albergue em
Stuttgart Hohenheim (Alemanha)
Fonte: MINKE (2005)**

2.1.1 Telhados verdes: intensivo e extensivo.

Os telhados verdes podem ser classificados em duas categorias: telhado verde Intensivo e telhado verde extensivo. O telhado intensivo exige maior manutenção e geralmente está associado a terraços ajardinados, necessitando de mão de obra qualificada para a sua manutenção (BIANCHINI e HEWAGE, 2011). Minke (2005) complementa que, para este sistema, é necessário uma espessura de substrato mínima de 30 cm, conforme figura 4. Na figura 5 e figura 6 é possível verificar alguns exemplos dessa técnica de cobertura verde.

Os telhados intensivos demandam mais irrigação e adubação e a estrutura para suportar esses jardins é mais reforçada devido ao peso desse tipo de cobertura quando saturada.



Coberturas Verdes Intensivas

6. Plantas, vegetação
5. Substrato/solo para CV intensiva
4. Camada de filtro permeável às raízes
3. Camada de drenagem e capilaridade
2. Camada de proteção e armazenamento
1. Pavimento de cobertura, isolante, impermeabilização.

figura 4 - Camadas Telhado verde Intensivo
Fonte: GREEN ROOF TECHNOLOGY (2012)



figura 5 - Exemplo de telhado verde de uso intensivo - Houston, USA
Fonte: GREEN ROOF TECHNOLOGY (2012)



figura 6 - Exemplo de telhado verde de uso intensivo – Beloit, USA
Fonte: GREEN ROOF TECHNOLOGY (2012)

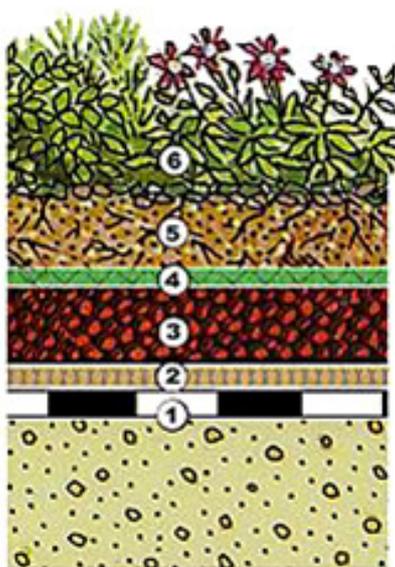
As coberturas extensivas caracterizam-se por pouca ou nenhuma manutenção, geralmente com substrato de espessura de 10cm e uso de plantas de baixa manutenção (figura 9), como por exemplo, as suculentas, que tem suas folhas e talos engrossados que permitem o armazenamento de água, reduzindo a necessidade de regas. O peso desse tipo cobertura é muito menor (figuras 7 e 8), ficando próximo ao peso de coberturas de telha de concreto. (KÖHLER *et al.*, 2002)



figura 7- Exemplo de cobertura de uso Extensivo - Chicago – USA
Fonte: GREEN ROOF TECHNOLOGY (2012)



figura 8 - Exemplo de cobertura de uso Extensivo - Chicago USA
Fonte: GREEN ROOF TECHNOLOGY (2012)



Coberturas Verdes Extensivas

6. Plantas, vegetação
5. Substrato/solo para CV extensiva
4. Camada de filtro permeável às raízes
3. Camada de drenagem e capilaridade
2. Camada de proteção e armazenamento
1. Pavimento de cobertura, isolante, impermeabilização.

figura 9 - Camadas telhado verde Extensivo
Fonte: GREEN ROOF TECHNOLOGY (2012)

Os telhados verdes do tipo intensivo podem apresentar uma redução maior do escoamento superficial e apresentar uma filtragem da água da chuva superior

quando comparado com os telhados verdes do tipo extensivo (SAADATIAN *et al.*, 2013). Entretanto, estes sistemas apresentam carga superior além de custos e manutenção mais elevados.

A variação entre a capacidade de contenção dos telhados do tipo extensivo e intensivo pode chegar a 15%. A redução da contaminação também é expressiva, cerca de 1,5 vezes menos quantidade de zinco; 2,5 vezes menos de cádmio e 3 vezes menos de cobre e chumbo (SAADATIAN *et al.*, 2013).

Contudo, o objetivo desta pesquisa é destacar um sistema de baixa ou nenhuma manutenção para ser aplicado em centros urbanos, substituindo as coberturas convencionais utilizadas. Desta forma, serão adotados os sistemas do tipo extensivo na presente pesquisa.

2.2 COMPOSIÇÃO E TÉCNICAS DE TELHADO VERDE

Os telhados verdes possuem uma composição básica que o caracteriza: estrutura, impermeabilização, drenagem, substrato e vegetação. Entretanto, os materiais empregados para cada uma dessas camadas pode variar, influenciando tanto em seu desempenho (MOODY e SAILOR, 2013) quanto em seu impacto ambiental e ciclo de vida (KOSAREO e RIES, 2007).

É importante destacar que, para o dimensionamento da construção do telhado verde, é necessário analisar as cargas sobre o mesmo quando este se encontra saturado, calculando o peso da drenagem, substrato e cobertura vegetal. Segundo Savi e Tavares (2013), um telhado verde com 10cm de espessura pesa aproximadamente 100kg/m².

Para a composição do telhado verde são necessárias algumas camadas que lhe garantem sustentação, impermeabilização e eficiência no seu funcionamento. Na figura 10 descrevem-se as camadas conforme o sistema empregado na presente pesquisa.

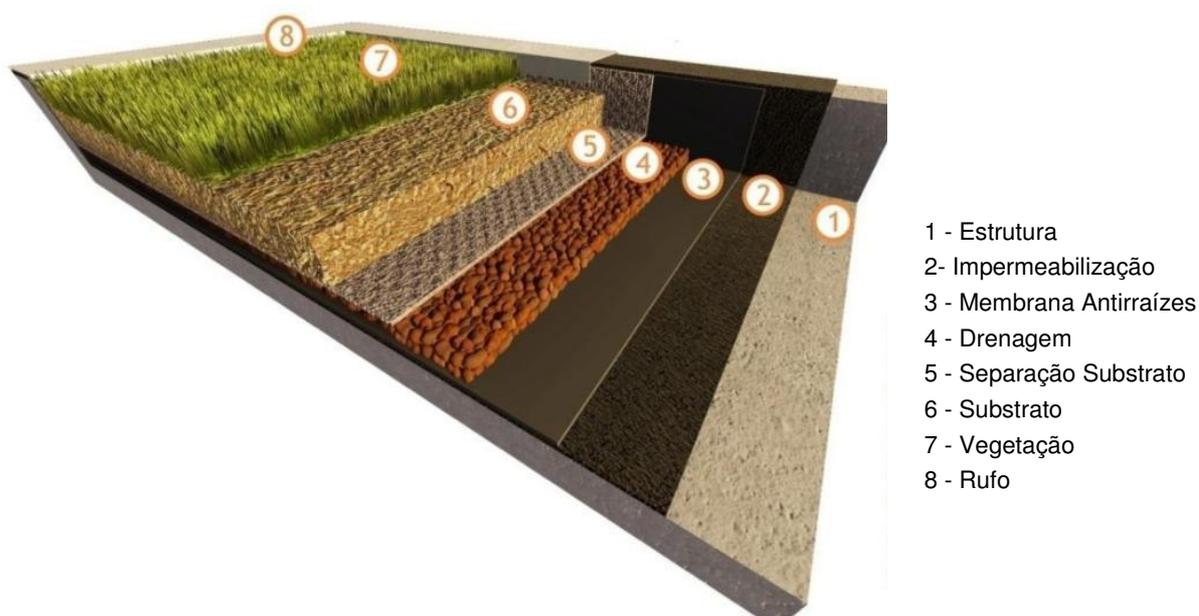


figura 10 - Composição telhado verde.
 Fonte: A autora (2014)

2.2.1 Estrutura

Um sistema de telhado verde pode ser estruturado sobre diferentes materiais, tais como: laje de concreto, tabuado de madeira, chapa de compensado estruturado, chapa OSB estrutural, placa cimentícia, telha metálica, *steel deck* (estrutura metálica em composição com camada de concreto), estrutura de madeira e bambu, estrutura do telhado existente, entre outros. Estruturalmente são necessários materiais que possuam resistência compatível à carga do sistema de telhado verde a ser adotado.

Para o dimensionamento e definição do sistema devem-se avaliar as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas técnicas) existentes, tais como a NBR 6118/2003, que trata sobre projeto de estrutura de concreto; a NBR 6120/1980 - cargas para cálculo de estruturas de edificações e a NBR 7190/1997 - estruturas de madeira, com o objetivo de verificar informações como: inclinação mínima, carga mínima de suporte, composição, etc.

Novas construções deverão prever, desde a etapa de projeto, a instalação de telhado verde e a tipologia deste para que o projeto estrutural contemple sua

carga. Minke (2005) afirma que, para o dimensionamento da estrutura, deve-se levar em consideração não apenas a carga permanente do telhado verde saturado de água e sua vegetação, mas também as cargas pontuais previstas, como circulação de pessoas ou colocação de outros elementos.

2.2.2 Impermeabilização

A impermeabilização deve ser escolhida pela compatibilidade com a estrutura definida para o telhado verde. É importante se atentar a essa etapa, pois a má execução ou uso de materiais inadequados podem resultar em patologias futuras na edificação.

Existem duas formas de impermeabilizantes: os flexíveis e os rígidos. A ABNT, na NBR 9575 (2003) define impermeabilização como:

Produto resultante de um conjunto de componentes e elementos construtivos (serviços) que objetivam proteger as construções contra a ação deletéria de fluidos, de vapores e da umidade; produto (conjunto de componentes ou o elemento) resultante destes serviços. Geralmente a impermeabilização é composta de um conjunto de camadas, com funções específicas (ABNT NBR 9575, 2003).

A forma mais difundida de impermeabilização para lajes de concreto armado é a manta asfáltica. Para sistemas com chapas de madeira pode ser utilizada a manta de polietileno de alta densidade (PEAD) ou a borracha líquida, sistemas aplicados na presente pesquisa, por exemplo.

Conforme a norma, o escoamento superficial de superfícies impermeabilizadas deve possuir inclinação de 1% na direção do ralo (ABNT- NBR 9574, 1986).

2.2.3 Membrana antirraiz

A membrana antirraízes garante a proteção da estrutura quanto a ação das raízes. Essa possui a função de conter a penetração das raízes na impermeabilização e na estrutura. Alguns sistemas de impermeabilização já cumprem essa função. É possível utilizar mantas de polietileno de alta densidade

(PEAD) para conter as raízes das vegetações e impermeabilizar a estrutura, por exemplo.

Segundo Minke (2005), quando a base da manta antirraízes é desuniforme ou rugosa, deve-se colocar abaixo dessa membrana protetora um feltro ou uma camada de areia, com a função de uniformizar e evitar rasgos na mesma.

2.2.4 Camada de drenagem

A camada de drenagem encaminha a água para o dreno, para que o solo não fique completamente saturado. Minke (2005) observa que os melhores materiais a serem utilizados são os mais porosos, que possuem a capacidade de absorver água, por exemplo: argila expandida (figura 11).



figura 11 - Drenagem com Argila expandida, sem retenção de água

2.2.5 Separação substrato

A manta de separação ou contenção do substrato separa o substrato da drenagem, garantindo o escoamento da água pluvial, mas evitando que o substrato interfira no sistema de drenagem do telhado verde.

Essa manta deve ser colocada sobre a camada de drenagem.

2.2.6 Substrato

O substrato é a camada que fará o suporte da vegetação; essa camada supre a vegetação de nutrientes e água. Por isso, para a colocação dessa camada é importante conhecer a espécie vegetal que será aplicada, quais os nutrientes necessários e o tipo de substrato que melhor se adéqua a ela. Substratos muito ricos em nutrientes podem ser negativos, principalmente para telhados verdes extensivos, pois o excesso de nutrientes pode acarretar em um rápido crescimento da vegetação e de ervas daninhas aumentando a manutenção do mesmo; por isso a importância do equilíbrio dos componentes do substrato.

Nascimento (2008) afirma que para coberturas extensivas devem ser utilizados substratos orgânicos ou inorgânicos.

Os substratos orgânicos são compostos feitos a partir da matéria vegetal, como resíduos vegetais e agrícolas (casca de pinheiros, fibras de coco, cascas de arroz e resíduos de poda).

Os substratos inorgânicos e minerais, segundo Cantor (2008), são mais adequados para o uso em coberturas verdes. São eles os agregados de argila expandida de xisto ou ardósia; e material vulcânico, como pedra-pomes e vermiculita.

O substrato deve ser drenante, leve e poroso; entretanto, deve ter a capacidade de retenção de água para aumentar a sobrevivência das plantas quanto ao estresse hídrico (FARRELL *et al.*, 2012).

Como, em telhados do tipo extensivo, a intenção é ter a menor carga possível no sistema, é fundamental escolher elementos de baixa densidade, como a vermiculita expandida e a casca de arroz carbonizada.

Um substrato composto de terra preta, turfa, casca de arroz e vermiculita, na proporção de 60% de material orgânico e 40% inorgânico, é o mais adequando para a região de Curitiba quanto ao desenvolvimento da espécie e retenção de água de chuva, afirma Muller (2014).

A profundidade do substrato também influencia o desempenho térmico da cobertura, assim como o aumento da umidade no solo devido ao processo de resfriamento evaporativo (SAADATIAN *et al.*, 2013).

2.2.7 Vegetação

A camada de vegetação é definida em conjunto com as demais camadas. Fatores como tipo de telhado verde, espessura do substrato, forma de drenagem, inclinação da cobertura, sombreamento por outras coberturas e obstáculos são essenciais para saber qual a espécie vegetal será utilizada.

A escolha das vegetações deve levar em conta ainda alguns outros fatores: resistência à seca, resistência ao frio, altura de crescimento da vegetação (MINKE, 2005). Para telhados extensivos é importante optar por vegetações que exijam pouca manutenção de rega e poda.

Diante dessas variáveis, a escolha da vegetação está ligada a região onde será instalado o telhado verde, sendo necessário avaliar o clima, a incidência e orientação solar, os ventos, média de temperatura, precipitação local e temperatura média.

As vegetações assumem grande importância para as cidades devido à sua capacidade de fixação de carbono e liberação de oxigênio. Segundo Getter *et al.* (2009), a presença de carbono em um sistema de telhado verde acontece da seguinte forma: 42,1% na Biomassa acima do solo, 41,4% na biomassa radicular e 4,6% no substrato. Getter *et al.* (2009) concluem que serão necessários apenas 9 anos para compensar o débito de carbono referente aos materiais que compõem a cobertura verde. Após esse período passa a ser creditado carbono, em relação ao telhado convencional.

Niachou *et al.* (2001) destacam a importância da escolha das vegetações para a análise de temperatura dos telhados verdes. Em seu estudo concluem que a temperatura do telhado verde, na face externa da edificação, pode ter uma variação de até 12°C em função do tipo vegetação utilizada. As temperaturas mais baixas do telhado verde, que variaram entre 26 e 29°C, foram medidas em lugares com predominância de vegetações escuras e mais densas. As temperaturas mais altas, que variaram entre 36 e 38°C, são as cobertas por vegetações esparsas e vermelhas, enquanto sobre a terra exposta chegou a temperaturas próximas ao valor de 40°C.

Saadatian *et al.* (2013) destacam que a análise das características das plantas é considerada como um dos parâmetros mais importantes para verificar a transferência de calor de um telhado verde, podendo ser medido através do índice de área foliar (IAF), a resistência estomática, a fração de cobertura e o albedo.

Estudos realizados por Wong *et al.* (2003) revelam que a área foliar tem grande relevância na eficiência da cobertura, quanto maior a área foliar e seu sombreamento do substrato menor a temperatura observada.

Sailor (2008 *apud* SAADATIAN *et al.*, 2013) destaca que o IAF está ligada a idade das plantas, à espécie vegetal e à sua capacidade de cobertura, podendo variar de 0,5 (menor) até 5,0 (maior); a resistência estomática determina a taxa de umidade das plantas; enquanto a fração de cobertura está relacionado o IAF calcula a fração do telhado verde que está coberta pelas folhas; e, por fim, o albedo que corresponde a um coeficiente de reflexão, ou seja, corresponde à capacidade de refletir a energia solar incidente sobre a superfície das folhas.

O sombreamento da área foliar das plantas, o isolamento do substrato, a refrigeração e transpiração dos telhados verdes reduzem o fluxo de calor (SAADATIAN *et al.*, 2013).

2.3 TELHADO VERDE: BENEFÍCIOS

A implantação de telhados verdes e jardins poderiam melhorar muito o clima das cidades por meio da purificação do ar, redução de pó e variação das temperaturas nos centros urbanos (ANDRADE e RORIZ, 2013). A aplicação de telhados verdes em 10% a 20% nas coberturas já garantiria um clima urbano saudável (MINKE, 2005).

A densidade e a espessura da camada de telhado verde, assim como a quantidade da superfície das folhas, são decisivas para alcançar os benefícios das coberturas verdes como: isolamento térmico, filtragem do ar, etc.

Destacam-se alguns dos benefícios do telhado verde:

2.3.1 Isolamento térmico, conservação de energia e proteção da edificação quanto aos raios solares

Os telhados verdes podem auxiliar no isolamento térmico da edificação e, como consequência, auxiliar na conservação de energia. Substrato, planta, drenagem e estrutura são elementos fundamentais que influenciam no desempenho térmico de um telhado verde (MOODY e SAILOR, 2013).

Segundo Machado *et al.* (2003), os telhados verdes contribuem para a proteção da edificação quanto a radiação solar pois, as folhas refletem a radiação solar protegendo sua cobertura, ponto mais vulnerável da construção, segundo os autores. Além disso, as coberturas verdes funcionam como um sistema de resfriamento evaporativo devido a evapotranspiração realizada pelas plantas e a retenção de água de chuva nas raízes, caules e folhas e no substrato.

Vecchia (2005) elaborou um estudo na Universidade de São Carlos onde construiu 5 protótipos de cobertura, sendo um de telhado verde leve e outros 4 de sistemas tradicionais de cobertura. O estudo comparou o desempenho térmico das diferentes coberturas. Na figura 12 é possível comparar a temperatura externa do ar, a temperatura interna do ar e a temperatura superficial do telhado verde.

A variação constatada foi de 8º C na hora mais quente do dia, registrada às 14:30h. Pode-se perceber um atraso térmico, pois o telhado verde age como um isolante, ou seja, o pico da temperatura externa aconteceu às 14:30 horas (34,4ºC) enquanto a interna aconteceu às 18:00 horas (28,8ºC). Vecchia (2005) destaca ainda que isso é resultado da “sua constituição termo física, massa e resistência térmica, ação de sombreamento provocado pelos arbustos da grama, entre outros efeitos térmicos benéficos característicos desse tipo de sistema de cobertura.”

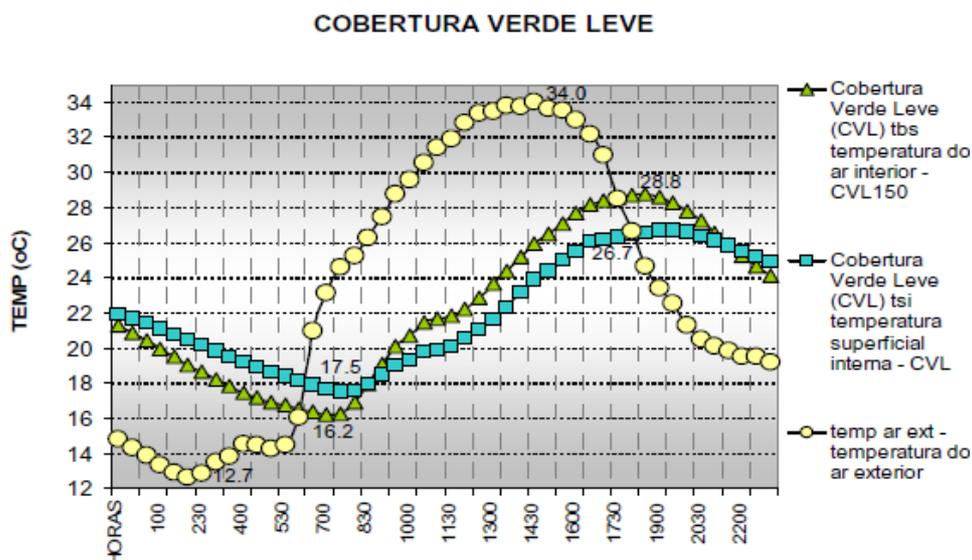


figura 12 - Comparativo contendo os valores da temperatura interna do ar (altura 1 metro do piso); temperatura superficial do forro e temperatura externa do ar nas horas do dia.
Fonte: VECCHIA (2005)

Na figura 13 é possível comparar o desempenho térmico de cada uma das coberturas, evidenciando que o telhado verde é o sistema mais eficiente quanto ao isolamento da edificação, entre os sistemas analisados. Todas as demais coberturas analisadas: aço galvanizado, telha de fibrocimento ondulada, laje pré-moldada com lajotas de cerâmica com pintura na cor branca e telhado cerâmico, tiveram o seu desempenho térmico inferior ao telhado verde.

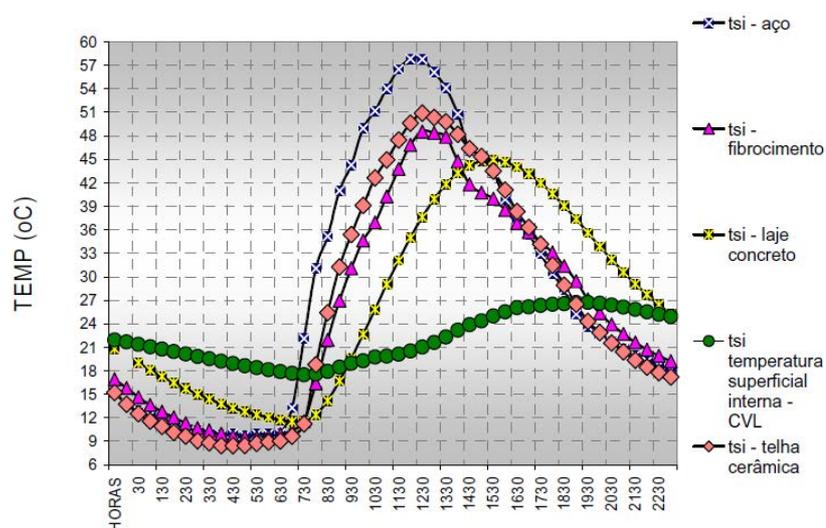


figura 13 - Comparativo das temperaturas superficiais internas de cinco protótipos: 1.) aço galvanizado; 2.) fibrocimento ondulada; 3.) laje pré-moldada cerâmica inclinada (sem telhas) e com impermeabilização, de cor branca, com resina de óleo vegetal (*Ricinus communis*); 4.)cobertura verde leve e, finalmente; 5.) telha cerâmica.
Fonte: VECCHIA (2005)

O telhado verde proporciona estabilidade na temperatura durante o dia e à noite. Temperaturas mais elevadas durante a noite (comparando com os demais sistemas) e mais baixas durante o dia. Isso é consequência das camadas da cobertura verde, que faz com que o calor seja dissipado de forma mais lenta.

Breuning (2014) destaca que os telhados verdes protegem a membrana de impermeabilização dos telhados quanto à influência externa, impedindo o envelhecimento acelerado devido à degradação causada pelos raios UV (Ultra Violeta). Segundo o autor, a vida útil de uma impermeabilização é de 20 anos e os telhados verde têm a capacidade de dobrar a vida útil da membrana.

2.3.2 Redução das ilhas de calor e da amplitude térmica

A incidência de radiação solar sobre as coberturas, principalmente as de coloração escura, fazem com que se absorva essa energia e libere-a lentamente a noite; como consequência, temos temperaturas muito elevadas em torno das edificações, sendo necessário o uso de aparelhos para amenizar as temperaturas. Essa redução de temperaturas poderia ser feita através da evapotranspiração das espécies vegetais.

As residências em áreas urbanas possuem, em sua grande maioria, coberturas cerâmicas, de concreto ou metálicas, o que diminui a absorção de umidade. Esse tipo de material e a impermeabilização do solo elevam a temperatura dos ambientes e dos envoltórios das edificações e, para suprir essa demanda, usam-se sistemas artificiais de refrigeração (LÖTSCH, 1981 *apud* MINKE, 2005).

O efeito de ilha de calor cria um ciclo vicioso de concentração de energia urbana. Com o aumento da temperatura aumenta-se, por consequência, o uso de ar condicionado (LIU *et al.*, 2012)

Estudo realizado por Gertis *et al.* (1997 *apud* MINKE, 2005) demonstra que uma laje com aplicação de impermeabilizante na cor preta pode chegar a uma temperatura superficial de mais de 90°C; entretanto, sua temperatura durante a noite estaria próximo aos 10°C. A cobertura vegetada não ultrapassaria os 25°C durante o mesmo dia de análise e durante a noite ficaria com temperatura por volta dos 15°C. Desta forma, tem-se uma variação de temperatura superficial nas lajes betumadas

de 80°C, quando nos telhados verdes é de apenas 10°C. Essa temperatura superficial mais baixa garante um micro clima no invólucro da edificação muito mais agradável, contribui para a redução das ilhas de calor e aumenta a vida útil da impermeabilização (figura 14).

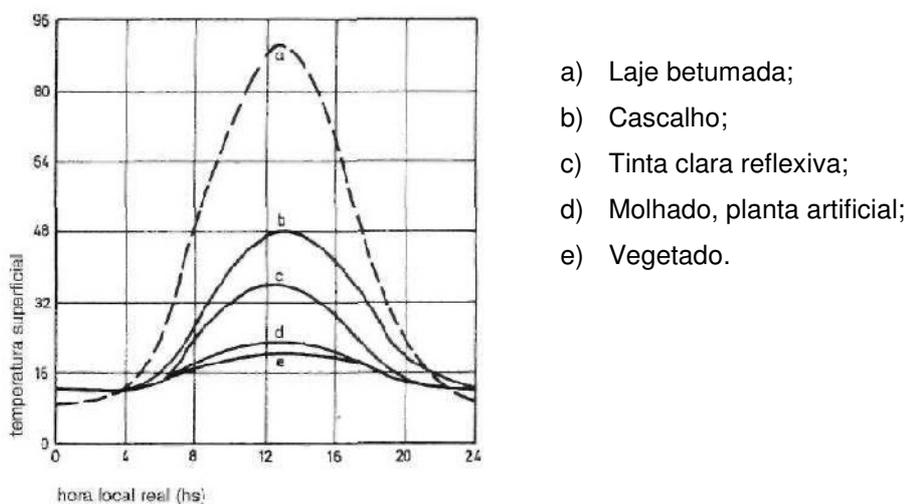


figura 14 - Temperaturas medidas ao longo do tempo em diferentes superfícies de coberturas planas em um dia ensolarado de verão.
Fonte: (GERTIS *et al.*, 1977, *apud* MINKE, 2005).

2.3.3 Sistemas de drenagem mais eficazes

Durante períodos de precipitação, a vegetação, o substrato e a camada de drenagem projetada em um telhado verde podem absorver quantidades significativas de águas pluviais e reduzir a quantidade de água escoada (CANTOR, 2008).

Baldessar (2012) analisou como os telhados verdes contribuem para aliviar os sistemas de drenagem das cidades. A autora comparou a água escoada entre três sistemas de cobertura: laje impermeabilizada, telha cerâmica e telhado verde. A tabela 1 ilustra o resultado obtido com o experimento e conclui que se pode ter uma redução de 70% da água que seria escoada para as galerias de água pluvial. O teste foi feito com um telhado de uso extensivo com apenas 5 cm de substrato.

tabela 1 - Análise comparativa entre três sistemas distintos de cobertura (laje impermeabilizada, telha cerâmica, telhado verde) e simulação através de software.

| Totalização de água escoada - Experimento | | | | | |
|---|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------|
| | Água escoada mm | Água escoada mm | Água escoada mm | Água escoada mm | |
| Período | Laje impermeável medido | Telhado de barro medido | Telhado verde medido | Telhado verde simulação software | Totais |
| Nov 2011 | 8,2 | 3,7 | 0,3 | 5,2 | Total mensal (em mm) |
| Dez 2011 | 109,9 | 85,1 | 29,1 | 36,2 | Total mensal (em mm) |
| Jan 2012 | 78,7 | 61,2 | 21,3 | 12,1 | Total mensal (em mm) |
| Fev 2012 | 128,3 | 101,2 | 49,0 | 55,0 | Total mensal (em mm) |
| | 325,0 | 251,2 | 99,6 | 108,5 | Total Geral (em mm) |
| | 100,0 | 77,3 | 30,7 | 33,4 | Total Geral (em %) |

Fonte: Baldessar (2012)

Baldessar (2012) conclui ainda que o telhado verde realmente contribui, através dos mecanismos de evapotranspiração e armazenamento, para a redução de água de chuva direcionada escoada pelos telhados verdes.

Estudo elaborado por Cunha e Mediondo (2004) demonstra que um telhado verde pode reter 14 mm de água de chuva. Desta forma, segundo o estudo, os primeiros 14 mm de chuva ficam retidos no telhado para então iniciar o escoamento, gerando um retardo do escoamento e auxiliando no desafogamento dos sistemas de drenagem, dependendo do período de estiagem que antecedeu a precipitação.

2.3.4 Produção de oxigênio, absorção de CO₂ e filtragem do ar

Sabe-se que o principal gás do efeito estufa é o CO₂ e as edificações são as maiores responsáveis por sua emissão (aproximadamente 50% das emissões), afirma Roaf (2006). A vegetação, pelo mecanismo da fotossíntese, filtra o ar absorve carbono e libera oxigênio.

Nowak (2004) *apud* Shinzato (2009) afirma que as plantas, por meio da abertura dos estômatos, removem partículas poluentes presentes no ar e os gases poluídos são dissolvidos pelas folhas das plantas. Além disso, afirma Shinzato

(2009), as plantas absorvem o carbono, estocando-o na sua estrutura durante o crescimento, além de remover contaminantes como: formaldeído, benzina e tricloroetileno.

2.4 ESTADO DA ARTE

Pesquisadores têm analisado os benefícios dos telhados verdes aplicados a situações específicas e avaliado diferentes variáveis com o objetivo de verificar a eficiência dessa tecnologia em diferentes locais e condições climáticas.

Segundo Henry e Frascaria-Lacoste (2012), a generalização das informações quanto aos benefícios dos telhados verdes podem acarretar em informações distorcidas. Os autores destacam que a análise das variáveis como: vegetação, substrato, tipo de construção, localização geográfica, entre outros, são decisivos para avaliar os benefícios desse tipo de cobertura.

Desta forma, são destacadas algumas pesquisas que fundamentam essa necessidade de análise específica para cada situação, mostrando que os dados poderão variar expressivamente em cada situação.

2.4.1 Artigo 01

Saadatian *et al.* (2013) realizam uma revisão de alguns artigos científicos que discorrem sobre o tema telhado verde, trazendo alguns resultados voltados aos seus benefícios no seu artigo: *A review of energy aspects of green roofs*. Destaca-se, na sequência, alguns dos resultados obtidos por esses pesquisadores e apresentados pelos autores.

Saadatian *et al.* (2013) destacam estudos nos quais viabiliza-se a instalação de telhados verdes em edificações existentes, ou seja, através do retrofit das coberturas. Segundo os autores, um estudo realizado em Melbourne por Wilkinson e Reed (2009, *apud* SAADATIAN *et al.*, 2013) demonstrou que em *retrofit* de cobertura de edificações para a instalação de telhados verdes, as edificações com lajes de concreto são as mais adequadas para receberem esse tipo de coberturas.

A norma brasileira NBR 6120/80, que discorre sobre as cargas para cálculo de estruturas de edificações, destaca que terraços com acesso ao público devem ser projetados para carga de 300kg/m^2 e aqueles sem acesso ao público com 200kg/m^2 . Segundo Savi e Tavares (2013), os telhados verdes podem ter carga de aproximadamente 90kg/m^2 quando saturados. Desta forma, pode-se perceber que as lajes existentes que cumprem a NBR 6120/80 suportam a carga da instalação de um telhado verde do tipo extensivo.

Castlelon e colaboradores ressaltam que a modernização dos edifícios com telhados verdes traz ainda mais benefícios que nos telhados novos, pois normalmente as edificações antigas contam com menor isolamento trazendo, desta forma, maior qualidade para o espaço interno (CASTLELON *et al.*, 2010 *apud* SAADATIAN *et al.*, 2013).

Saadatian *et al.* (2013) abordam ainda a influência de qualquer componente do telhado verde na sua eficiência. Os telhados verdes podem ser projetados sobre diferentes superfícies como laje, telhas metálicas, e cada um desses irá apresentar um desempenho diferente. O tipo de substrato e sua espessura e as espécies vegetais também influenciam no desempenho da cobertura.

Estudo de Kosareo e Rios (2007) destaca a diferença entre telhados verdes do tipo intensivo e extensivo no escoamento de água pluvial, sendo que os primeiros podem reduzir cerca de 85% do escoamento da água e os do tipo extensivo em torno de 60%. Já um estudo realizado por Baldessar (2012) destaca que telhados extensivos nas condições climáticas de Curitiba podem reter cerca de 69% da água da chuva. Desta forma, as condições de precipitação local e a tipologia do telhado verde podem influenciar na retenção de água da chuva.

Esse resultado é importante para a tomada de decisão quanto a tipologia de cobertura a ser adotada, ou seja, se há necessidade de uma retenção maior de água. Por exemplo, em centros urbanos com sistemas de drenagens saturados, recomenda-se o uso de tipologias que possuam a capacidade de maior retenção; se em áreas rurais com grande capacidade de absorção de água pelo solo, pode-se optar por um sistema mais leve e com menos retenção.

Saadatian *et al.* (2013) destacam que a redução da contaminação da água da chuva também é expressiva quando comparada com telhados tradicionais, cerca de

1,5 vezes menos quantidade de zinco, 2,5 vezes menos de cádmio e 3 vezes menos de cobre e chumbo.

Estudo elaborado por Wong *et al.* (2003) e abordado por Saadatian *et al.* (2013) destaca que a aplicação de plantas nas superfícies dos edifícios é considerada uma técnica que reduz a temperatura da edificação em até 20°C e pode reduzir também a energia gasta com ar condicionado variando de 25% a 80%. Os autores destacam que os telhados verdes possuem grande contribuição nos dias de verão pois segundo eles a principal função das coberturas verdes é evitar que a radiação solar aqueça os espaços internos da edificação (WONG *et al.* 2003).

Os telhados verdes são capazes de refletir 27% da radiação solar e absorver 60% através da fotossíntese (WONG *et al.* 2003).

Estudo de Martens *et al.* (2008 *apud* SAADATIAN *et al.*, 2013) destaca que os benefícios dos telhados verdes, quanto à economia de energia, são ainda maiores nas edificações térreas, pois o ganho com isolamento/conforto térmico se estende por toda a edificação.

Saadatian *et al.* (2013) destacam em seu artigo o estudo de Getter *et al.* (2011), o qual demonstra que na região de Midwestern, nos EUA, os telhados verdes foram capazes de reduzir 5°C durante o outono. Durante períodos frios e úmidos, o fluxo de perda de calor foi menor na cobertura verde quando comparada com uma cobertura com cascalho. Os autores constataram ainda que a maior variação aconteceu no verão, reduzindo o fluxo de calor em sua envoltória em média 67%; no inverno essa redução foi em torno de 13%. Enquanto isto, o telhado com cascalho demonstrou que houve ganho de calor no verão (GETTER *et al.*, 2011, *apud* SAADATIAN *et al.*, 2013).

Estudo realizado em nove cidades no mundo por Alexandri e Jones (2008) demonstrou que Brasília e Hong Kong apresentaram a melhor redução em resfriamento, com magnitude de 100%. Este estudo demonstra ainda a eficiência dos telhados verdes para climas quentes, podendo os mesmos reduzirem a carga térmica de arrefecimento de 100% para 32%. Os autores destacam ainda que os telhados verdes contribuem de forma mais efetiva para a redução das ilhas de calor que a aplicação de paredes verdes, pois o maior ganho térmico da edificação é pela cobertura (ALEXANDRI e JONES, 2008 *apud* SAADATIAN, *et al.*, 2013).

A capacidade de ganho ou perda de calor pode estar ligada à espécie vegetal selecionada. Desta forma, um estudo em Cingapura buscou interpretar a influência das espécies vegetais nas coberturas através da sua área foliar. Para tal experimento foram utilizados termopares para realizar as medições em seis espécies vegetais distintas. Os resultados mostraram a influência direta da área foliar com o desempenho da cobertura. As espécies vegetais mais densas causaram maior sombreamento e, como consequência, a temperatura verificada foi mais baixa. A diferença máxima entre a temperatura da radiação média e temperaturas globais parece ser em torno de 4 °C, o que corresponde a um bom indicador da eficiência do telhado verde no combate ao efeito de ilha de calor (WONG *et al.* 2003).

Outro fator que influencia o desempenho dos telhados verdes é a densidade. Se a densidade do substrato aumenta, a condutividade térmica e, portanto, o fluxo de calor do solo também aumentam, ou seja, substratos mais profundos apresentam um desempenho térmico melhor (SAADATIAN *et al.*, 2013).

Castleton *et al.* (2010 *apud* SAADATIAN *et al.*, 2013), em seu estudo, relatam a influência da umidade na temperatura da edificação, ressaltando que em meios mais úmidos o calor de dentro da edificação é retirado com maior facilidade.

Quanto aos materiais e à sustentabilidade aplicada a eles, Bianchini e Hewage (2011) fizeram um estudo de análise do ciclo de vida dos telhados verdes e concluíram que os telhados verdes do tipo extensivo possuem um impacto ambiental menor que os telhados do tipo intensivo. Isso é decorrência da espessura do sistema e sua manutenção; entretanto, os autores ressaltam a necessidade de explorar materiais de menor impacto ambiental que os a base de polietileno e polipropileno utilizado para impermeabilização, por exemplo. Vecchia (2005) destaca também a importância de eliminar os materiais a base de petróleo por outros com menor impacto ambiental.

A partir da análise desses diferentes estudos, Saadatian *et al.* (2013) afirmam que os telhados verdes possuem muitas vantagens e algumas desvantagens, ressaltando a questão que envolve a água como um ponto positivo devido a retenção da água da chuva, a redução das instalações de tratamento de água e o aumento da qualidade da água escoada. Entretanto, dependendo do tipo do telhado e da vegetação utilizada, é necessário um alto consumo de água com sua irrigação.

No que diz respeito à qualidade do ar, ela produz mais oxigênio e fixa dióxido de carbono, além de criar habitats para a vida selvagem importante para o ecossistema. No que diz respeito à interação humana, os telhados verdes proporcionam oportunidades de lazer e convivência, além do apelo estético desse tipo de tecnologia e ajuda a melhorar a qualidade urbana (SAADATIAN, *et al.*, 2013).

Os autores trazem um apanhado dos diferentes benefícios que os telhados verdes proporcionam para a edificação e ressaltam ainda que os estudos demonstram uma variação entre os resultados alcançados. Essa diferença entre os resultados é associada à variação da tipologia dos telhados, localização, espécies e substrato.

Tendo em vista essa especificidade destacada pelos autores, busca-se analisar alguns parâmetros para o desempenho das coberturas nos telhados verdes na cidade de Curitiba, destacando a influência das espécies vegetais.

2.4.2 Artigo 02

Os resultados que demonstram as evidências dos benefícios dos telhados verdes em climas quentes durante o verão são mais evidentes e expressivos. Entretanto, no inverno existem alguns benefícios, principalmente quando comparados com edificações sem isolamento térmico, mas que são pouco abordados pelos pesquisadores.

Jim (2014) elabora um experimento que tem como objetivo a análise térmica das coberturas verdes durante o inverno, apresentado através do seu artigo: *Passive warming of indoor space induced by tropical green roof in winter*. Esse estudo aproxima-se da proposta desta pesquisa, tendo em vista que Curitiba possui temperaturas baixas, principalmente durante o inverno, sendo importante o papel das coberturas verdes nesse período.

No artigo, "Aquecimento passivo dos espaços internos através de telhado verde para o inverno em regiões com o clima tropical" (tradução da autora), Jim (2014) afirma que existem poucas pesquisas que analisam o desempenho térmico de telhados verdes para o clima de inverno. O autor destaca ainda que os edifícios sem isolamento térmico ou aquecimento artificial podem resultar na baixa qualidade

de vida e saúde dos ocupantes das edificações. A maioria dos estudos de telhados verdes abordam os benefícios quanto a capacidade de isolamento da edificação no verão, se caracterizando pela economia de energia e o conforto humano, ou seja, através da refrigeração passiva. É importante destacar a contribuição e a variação do desempenho dos telhados verdes quanto ao aquecimento passivo.

Jim (2014) pesquisa a influência dos telhados verdes no aquecimento das edificações em clima subtropical úmido, como em Hong Kong, e destaca que muitas soluções relacionadas à questão de saúde e conforto, em estações com clima quente, estão relacionadas à melhoria do espaço urbano em função do ecossistema criado pelos espaços verdes urbanos.

A falta de isolamento térmico na maioria dos edifícios de Hong Kong permite uma troca de calor mais intensa do espaço interno e externo, aumentando assim a carga de arrefecimento ou aquecimento nas edificações (JIM, 2014).

Assim como a realidade de Curitiba, Jim (2014) afirma que em Hong Kong raramente adota-se sistemas de aquecimento para o inverno, tornando, desta forma, os espaços bastante desconfortáveis nos dias frios.

Se sistemas de aquecimento passivo através da radiação solar ou da redução da perda de calor dos espaços internos forem adotados, o resultado do desempenho térmico melhor. Além disso, os telhados verdes podem aumentar a área útil de uma edificação através do uso dessas coberturas.

Diante dessa realidade e a da falta de pesquisas quanto à influência dos telhados verdes em clima frio, Jim (2014) realiza um experimento para analisar a variável de temperatura no inverno de Hong Kong, verificando a influencia da fisiologia vegetal no desempenho das coberturas verdes.

Hong Kong caracteriza-se pelo seu alto índice de urbanização com uma densidade populacional de 6.620 pessoas/km², com médias climáticas no inverno variando entre 16,3°C a 17,9°C, média superior à de Curitiba, que é de 11°C (IBGE, 2010).

O experimento foi realizado em Tseung Kwan em três apartamentos de um edifício residencial com as mesmas condições, sendo um deles cobertura controle e dois telhados verdes (JIM, 2014).

Sobre uma laje de concreto armado impermeabilizada foram instalados os telhados verdes, compostos por uma camada de 50 mm de substrato para duas

espécies vegetais diferentes: sedum (*Sedum mexicanum*) e grama amendoim (*Arachis pintoii*), com composições de substratos distintas e adequadas para cada uma das espécies vegetais. Na figura 15 pode-se verificar que a camada de lã de rocha é utilizada apenas na grama amendoim, pois serve para reter água da chuva. Devido à característica do *Sedum mexicanum* de retenção de água, não é necessária essa camada, afirma o autor.

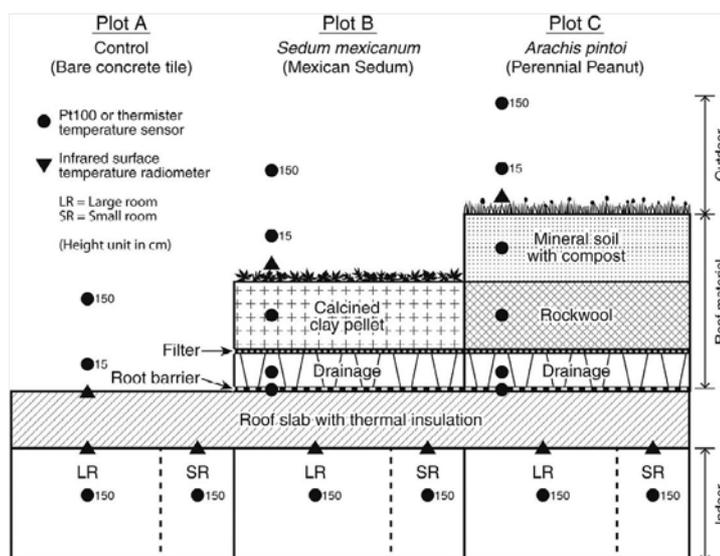


figura 15 - Composição das três coberturas: Plot A: Cobertura de controle (tradicional); Plot B, telhado verde com a espécie Sedum; Plot C: telhado verde com Grama Amendoim. Marcando a posição dos sensores de temperatura e suas alturas. Fonte: Jim (2014)

Diferente da proposta desta pesquisa, Jim (2014) adotou um sistema de irrigação automática por aspersão.

As duas espécies vegetais escolhidas pelo autor são perenes, sendo que a *Arachis pintoii* possui um crescimento rasteiro e caracteriza-se pela tolerância as altas temperaturas e por ser uma planta do tipo C3, ou seja, realiza fotossíntese de forma comum. A espécie *Sedum mexicanum* é uma planta extremamente tolerante à seca devido a sua característica de suculenta, realiza fotossíntese CAM, forma incomum de fotossíntese adaptada ao estresse hídrico. As plantas do tipo CAM fecham os estômatos e reduzem a transpiração durante o dia para conservar a umidade e abrem estômatos à noite, sequestrando carbono em ácidos orgânicos para uso na fotossíntese durante o dia. Segundo o autor, essa espécie é bem adaptada para telhados em regiões de clima tropical (JIM, 2014).

Jim (2014) realizou as medições com uso de termosensores e radiômetro infravermelhos sem contato, conforme figura 15. Foram medidas temperaturas do ar, do solo e umidade, sendo os dados coletados na fração de 15 minutos.

Foram escolhidos dias que se caracterizavam como dias típicos de inverno em Hong Kong, conforme registro meteorológico dos últimos 30 anos, sendo escolhido um dia típico de cada principal condição climática: dia de sol, dia nublado e dia com chuva (JIM, 2014).

Na figura 16 e figura 17 é possível verificar a variação de temperatura nos três dias entre os três sistemas distintos.

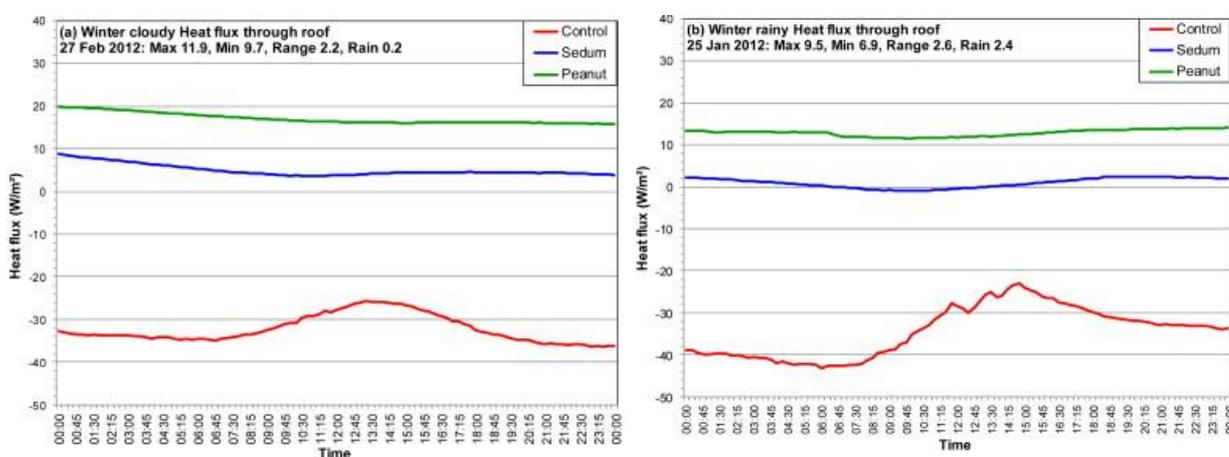
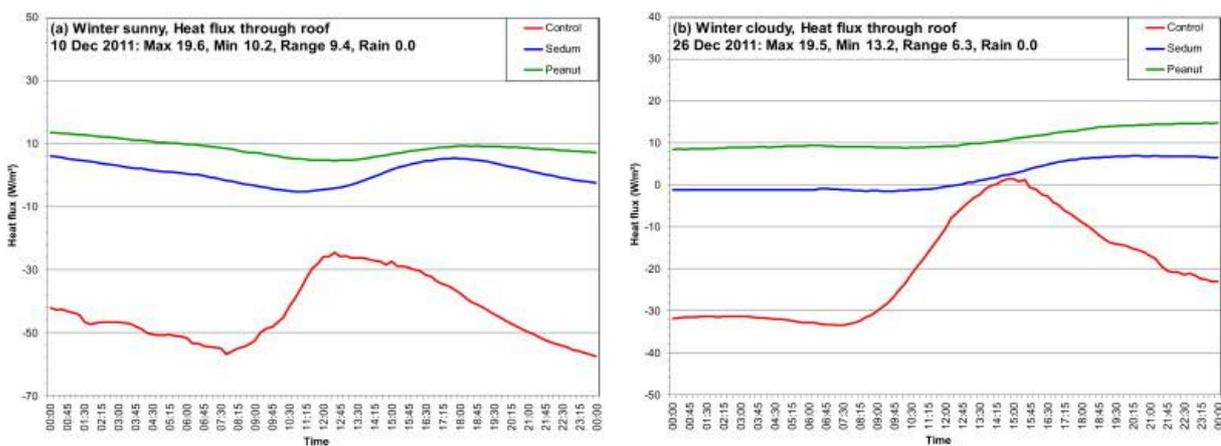
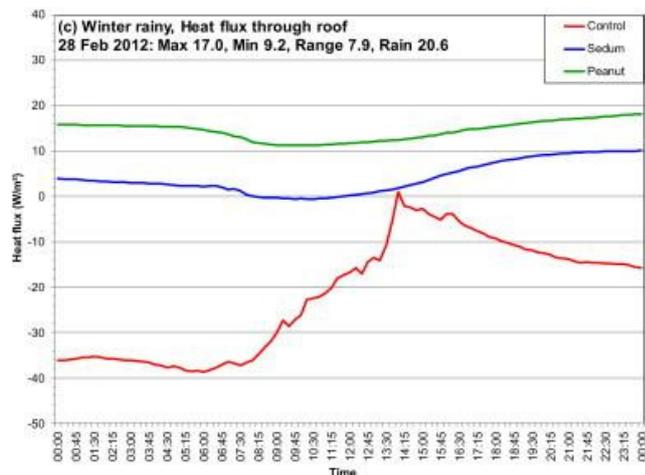


figura 16 - Fluxo de calor diurno através do telhado em Parcelas A, B e C por dois dias mais frios nomeadamente adicionais para: (a) Dia de inverno nublado, e (b) dia chuvoso de inverno. A temperatura é, em °C e precipitação em mm.

Fonte: Jim (2014)





**figura 17 - Fluxo de calor diurno através do telhado em Parcelas A, B e C para três cenários climáticos: (a) dia de inverno ensolarado, (b) dia de inverno nublado e (c) dia chuvoso de inverno. A temperatura é, em °C e precipitação em mm.
Fonte: Jim (2014)**

Na cobertura controle, no dia de inverno ensolarado, Jim (2014) conclui que as temperaturas externas variam mais que as temperaturas internas e as temperaturas do ar possuem uma variação maior que a temperatura superficial, ou seja, o fluxo de calor é de cima para baixo, para o espaço interno.

No dia de inverno nublado, na cobertura de controle, há uma maior amplitude diurna de fluxo de calor em comparação com o dia ensolarado. No entanto, a perda absoluta de calor interior ainda é bastante significativa. O fluxo de calor negativo é acentuada no dia nublado frio, conforme figura 16a.

Quanto ao dia de inverno chuvoso, a cobertura de controle apresentou um padrão similar ao do dia nublado sendo que, nessa condição, as temperaturas do ar se aproximaram da temperatura ambiente. O autor destaca ainda que, em um dia chuvoso frio, a dissipação do calor interno tem uma perda acentuada, mesmo em torno do meio-dia. No dia de inverno chuvoso, a cobertura de controle apresentou um padrão semelhante ao dia nublado, entretanto as temperaturas interiores são ainda mais baixas. Desta forma, em um dia de chuvoso, a dissipação de calor interno é intensa mesmo nas horas mais quentes do dia (JIM, 2014).

No dia de inverno ensolarado, no telhado verde com sedum, pode-se observar que o telhado de controle apresentou um aquecimento maior. Com isso, nos períodos de pico de calor obteve-se um fluxo de calor para baixo, ou seja, para o espaço interno. Desta forma, o telhado verde consegue uma transferência de calor atrasada para dentro da edificação devido à ação da capacidade térmica gerada

pelo aumento da capacidade térmica na cobertura. No dia nublado o aquecimento na superfície foi reduzido, sendo que em alguns momentos o fluxo de calor foi igual a zero e em outros pôde-se observar uma pequena quantidade de fluxo de calor para baixo (dentro do ambiente). No dia chuvoso, durante o período da manhã, observa-se um pequeno fluxo negativo, ou seja, perda de calor do espaço interno para o meio, e depois desse período pode-se perceber uma inversão do sentido do fluxo de calor, tornando-se positivo (JIM, 2014).

No telhado verde com a grama amendoim, os resultados para o dia ensolarado foram similares ao do telhado verde com a planta sedum, entretanto mostraram uma variação mais intensa quanto à temperatura superficial da planta. Segundo o autor, o fluxo de calor é para baixo e unidirecional ao longo de todo dia, auxiliando no aquecimento passivo do ambiente e se mostrou superior ao do telhado verde com sedum, mostrando-se mais eficaz. Isso pode ser observado devido a reduzida amplitude térmica ao longo do dia, o que indica a ação da inércia térmica devido à elevada capacidade térmica do sistema, consequência da trama da grama amendoim e da espessura do substrato com a camada de lã de rocha.

No dia nublado, o telhado com grama amendoim apresenta comportamento semelhante ao telhado com a planta Sedum, entretanto com valores mais eficientes, ou seja, apresenta maior fluxo de calor para o espaço interior. Já no dia chuvoso, a diferença de temperatura entre o telhado verde e a superfície interior da cobertura é a mais alta, demonstrando que existe uma redução no fluxo de calor para fora do ambiente interno. O autor, a partir dessa pesquisa, conclui que os telhados verdes no inverno tropical tem recebido pouca atenção e o resultado se mostra diferente da característica normalmente apresentada em zonas climáticas mais frias.

Em climas frios, a preocupação do telhado verde deve ser quanto à capacidade do telhado verde em reduzir a perda de calor interno para o ambiente externo mais frio. Desta forma, Jim (2014) destaca algumas conclusões quanto à sua pesquisa.

1. O telhado de controle perde uma quantidade significativa de calor de forma negativa (ou seja, para cima);
2. Os substratos dos telhados verdes podem armazenar energia térmica através da conversão de radiação solar em calor sensível durante o dia;
3. Os telhados verdes podem formar um gradiente térmico para conduzir o fluxo de calor de forma positiva (para o interior da edificação) no inverno;

4. O substrato poroso e a lã de rocha podem armazenar água para aumentar a capacidade térmica;
5. As camadas de contrapiso e drenagem, que ficam abaixo do substrato, podem adquirir o calor que fica armazenado no substrato através da dissipação do calor;
6. Mesmo o telhado verde com a espécie sedum com 5 cm de substrato pode adquirir o efeito de dissipação de calor suficiente para permitir o fluxo do calor que aqueça o ar interior;
7. O telhado verde com a grama amendoim, devido a camada de substrato de 10cm, apresentou capacidade térmica mais elevada, permitindo a dissipação de calor de forma mais intensa;
8. Telhados verdes extensivos podem favorecer o aquecimento passivo do interior das edificações no inverno tropical, resultando em uma economia no aquecimento das edificações;
9. Como resultado destaca-se que o efeito de dissipação de calor é mais eficiente em dias chuvosos, seguido de dias nublados e por fim dias ensolarados. Esse resultado indica que a entrada de mais energia solar aumentou a evapotranspiração e, como consequência, atenuou o efeito. Desta forma, a maior incidência solar suprime, ao invés de melhorar, o efeito de dissipação de calor;
10. O comportamento térmico de telhados verdes no inverno merece mais investigação mais profunda (JIM, 2014).

A presente pesquisa objetiva analisar a eficiência da cobertura verde para a cidade de Curitiba. Diante da pesquisa feita por Jim (2014), pode-se concluir que o objetivo, para as condições climáticas de Curitiba, principalmente nas estações frias é garantir um isolamento da cobertura e tentar criar um fluxo de calor para baixo, para dentro da edificação. Desta forma, deve-se criar uma capacidade térmica na cobertura para as estações de inverno, a fim de conseguir a inércia térmica da cobertura.

Com a inserção de um elemento a mais na cobertura (lã de rocha) não fica clara a ação da espécie vegetal no desempenho da cobertura. Desta forma, para verificar o desempenho da espécie vegetal, é importante manter a mesma

composição do substrato para que a variação seja consequência da escolha da espécie.

2.4.3 Artigo 03

A pesquisa elaborada por Liu *et al.* (2012): *Drought tolerance and thermal effect measurements for plants suitable for extensive green roof planting in humid subtropical climates* tem o objetivo de analisar o desempenho dos telhados verdes através da variação de espécies vegetais, e a primeira análise a ser feita é quanto à resistência das plantas ao estresse hídrico. Liu *et al.* (2012) realizam um estudo para verificar a tolerância de algumas espécies quanto ao estresse hídrico, além de verificar o desempenho térmico dessas espécies para o clima subtropical úmido.

Os autores afirmam que está comprovado a eficácia dos telhados verdes, tanto em climas quente, como em climas frios. Segundo os autores, os telhados verdes são utilizados com amplas funções, mas destaca-se principalmente para a conservação de energia e redução da poluição.

Países de todo o mundo estão promovendo os edifícios verdes como forma de resolver os problemas dos espaços verdes urbanos insuficientes, através da criação de mais superfícies horizontais e verticais ajardinados. Essa técnica funciona como forma de impedir que o calor solar entre dentro de casa e assim reduza as temperaturas interiores e, por conseqüência, aumente o uso de ar condicionado. As construções verdes não só reduzem a temperatura e economizam energia, mas também ajudam no controle do micro clima, melhoram a paisagem visual, criam um ambiente ecológico de maior biodiversidade, retardam o escoamento das águas pluviais, protegem os edifícios, reduzem a poluição do ar e reduzem os ruídos externos (LIU *et al.*, 2012)

Liu *et al.* (2012) destacam que as edificações recebem duas vezes mais radiação solar pelos telhados do que pelas superfícies verticais, tais como paredes e esquadrias. Portanto, o objetivo de seu estudo era o de melhorar a seleção de plantas para arborização no último andar testando a conservação da água, tolerância à seca, e os efeitos térmicos de plantas específicas para o clima de Taiwan.

Para a realização do experimento, Liu *et al.* (2012) utilizaram 31 espécies vegetais diferentes para analisar a conservação de água, a tolerância à seca e os efeitos térmicos das mesmas, conforme figura 20, incluindo plantas das famílias *Commelinaeaceae*, *Bromeliaceae*, *Crassulaceae*, *Portulacaceae*, *Asteraceae*, *Aizoaceae*, *Euphorbiaceae*, *Lamiaceae*, e *Liliaceous*, tendo como características plantas suculentas, seduns, plantas do tipo CAM.

Liu *et al.* (2012) ressaltam que ambientes com alto índice de luz solar e temperaturas altas levam as plantas rapidamente ao estresse hídrico. Entretanto as plantas utilizam algumas estratégias para se protegerem como: reflexo da folha, mudança de posição da folha e resfriamento evaporativo. Ainda, segundo os autores, o nível de tolerância à seca é um fator fundamental para os telhados verdes extensivos sobreviverem.

As plantas do tipo CAM são recomendadas para telhados verdes, pois resistem ao estresse hídrico devido à sua capacidade de fechamentos dos estômatos de dia, acumulando ácido orgânico, e abertura à noite para realizar a fotossíntese. Desta forma, evitam a evaporação de água durante o dia (LIU *et al.*, 2012).

Para análise térmica realizada com as plantas, foram selecionadas nove plantas com morfologias diferentes, variando características, como tamanho e cor. Para esse experimento os autores não utilizaram apenas espécies resistentes à seca. Para a uniformidade dos resultados, as espécies foram plantadas obtendo um cobertura de 100% do solo e as medições foram feitas depois o crescimento das plantas (LIU *et al.*, 2012).

Em Taiwan, cidade onde foram realizados os experimentos, a temperatura média é superior a de Curitiba, sendo que no mês de agosto apresentou média de 28,7°C e em novembro de 22°C. O experimento foi locado sobre um edifício de 8 andares livre de sombreamento.

Nesse estudo, para as medições, foi utilizado um *datalogger* com termopar do tipo K, além de uma câmera infravermelho para poder realizar a análise da influência da planta na regulação térmica. O experimento foi dividido em três etapas: a primeira com uso de nove espécies diferentes, com características morfológicas diferentes; a segunda com a mesma espécie, mas com três alturas

diferentes; e, a terceira, com a mesma espécie com variação da coloração das folhas (arroxeadada e esverdeada), conforme figura 18 (LIU *et al.*, 2012).

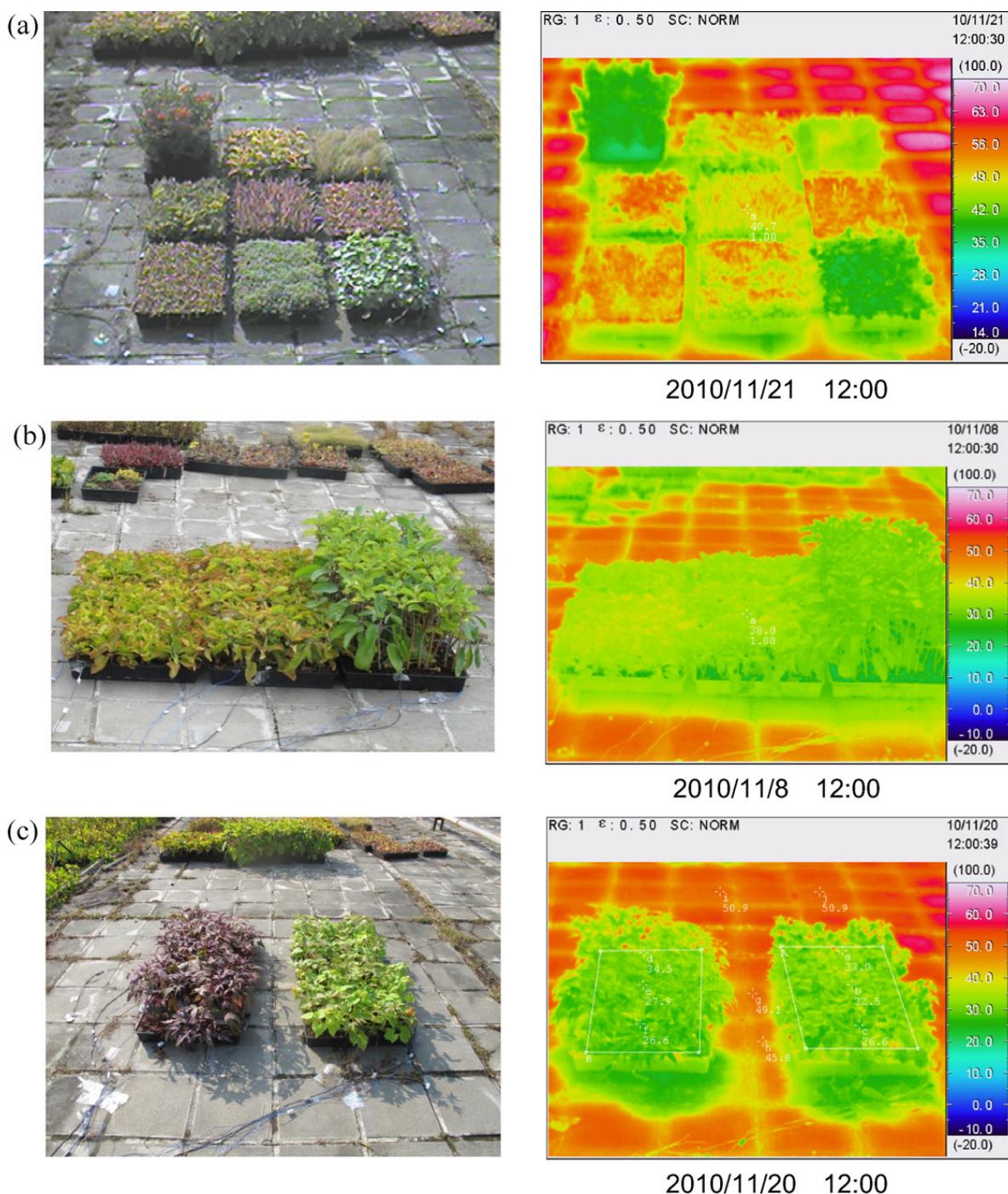


figura 18 - Análise dos efeitos térmico com imagem do infravermelho térmico; (a) nove tipos de espécies vegetais; (b) *Bryophyllum pinnatum* com diferentes alturas; (c) *Ipomoea batata* com diferentes cores das folhas
Fonte: LIU *et al.* (2012)

As medições foram feitas entre 10:30 e 15:00 horas durante três distintos dias no mês de novembro. As temperaturas obtidas (superfície das folhas, abaixo das

plantas, temperatura do ar e do piso) foram medidas a cada 5 minutos. A temperatura das folhas foram obtidas também com o infravermelho, conforme figura 18 (LIU *et al.*, 2012)

Conforme a figura 19, a temperatura média mais baixa na superfície da folha foi na espécie *T. japonica (Houtt.) DC.* a 35,8°C. A mais alta temperatura média da superfície ocorreu na *C. repens L.* com 46,7°C. A análise da temperatura superficial das folhas, conforme a figura 19, mostra que as temperaturas de ambos *T. japonica (Houtt.) DC.* (35,8 ° C) e *I. williamsii cv.* (36,8°C) foram menores do que 40°C, afirmam Liu *et al.* (2012).

As temperaturas da superfície da folha de plantas suculentas são todos evidentemente superiores. As plantas do tipo C3 têm taxas de evaporação mais elevadas do que as do tipo CAM, afirmam os autores.

O efeito de arrefecimento pode ser observado através da comparação da redução da temperatura sob a planta e a temperatura do solo. *I. williamsii cv.* teve a maior redução de temperatura, com uma diferença de 17,1°C, seguido por *S. trifasciata cv. Hahnii* de 17,5°C e *B. Pinnatum Lam. Kurz* a 15,9 °C. *C. repens L.* apresentou a menor redução de 10,2°C.

Na medida em que o solo abaixo dos módulos de vegetação é em cimento, pode-se obter elevadas temperaturas, em torno de 35-40°C. A diferença entre a temperatura do solo e a temperatura por debaixo da planta pode ser superior a 15°C.

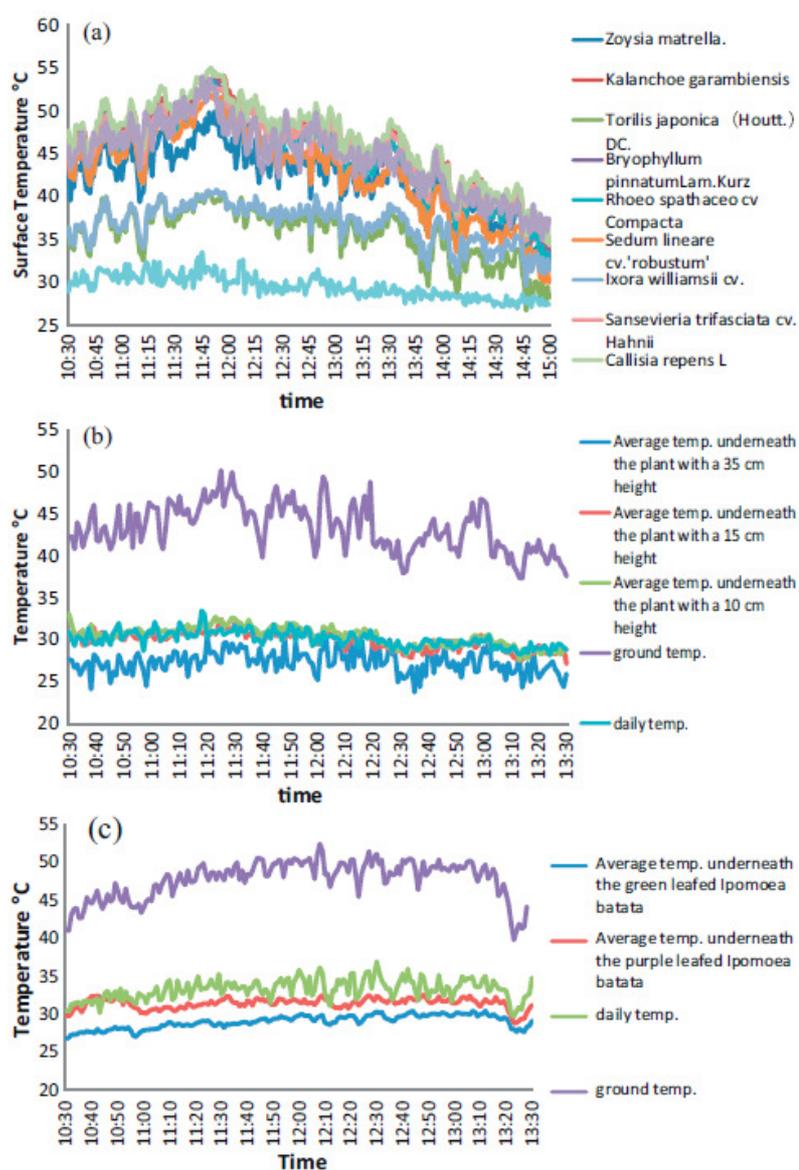


figura 19 - Variação de temperatura versus o tempo na superfície das folhas para:(a) nove tipos de espécies vegetais; (b) *Bryophyllum pinnatum* com diferentes alturas; (c) *Ipomoea batata* com diferentes cores das folhas

Fonte: LIU *et al.* (2012)

A temperatura da planta é afetada por muitos fatores, como a cobertura, taxa de penetração, taxa de reflexão, taxa de absorção e taxa de evaporação. Assim, a morfologia da planta, a composição da folha, o tamanho, a forma, o ângulo e tipo influenciam sobre cada variável (LIU *et al.*, 2012)

As temperaturas para plantas com alturas de 35 cm foram menores do que naquelas com altura de 15 cm que, por sua vez, foram menores do que as temperaturas de plantas com uma altura de 10 cm. Plantas mais altas têm mais folhas, que se sobrepõem umas as outras para reduzir a temperatura média da

superfície da folha. Desta forma, conforme análise estatística, os autores Liu *et al.* (2012) concluíram que a altura da planta é um fator que influencia no desempenho de uma cobertura verde.

Quanto à análise em relação à influência da cor no desempenho térmico de uma cobertura verde, a temperatura média da superfície de espécie *I. batata*, com folhas de cor esverdeada, foi de 31,2°C, enquanto que a variedade de folhas arroxeadas teve média de 30,5°C. Entretanto, a menor temperatura média por baixo da planta era da folha verde com 29°C, ou seja, 4,2°C mais baixa do que a temperatura média diária. Já a temperatura sob a planta com cor roxa foi ainda mais elevada do que a temperatura da superfície da folha. Isto prova que o *I. batata* verde exibiu a maior diferença de temperatura entre a temperatura sob a planta e a temperatura do solo, indicando que é mais eficiente para reduzir a temperatura do solo. Segundo Liu *et al.* (2012), essa característica é resultado da maior refletividade das folhas verdes do que das folhas roxas, influenciando assim na redução de temperatura.

Quanto à tolerância à seca, Liu *et al.* (2012) selecionaram 31 tipos diferentes de vegetações e semearam em bandejas de plantação. As sementes foram irrigadas em um período de 3 meses até apresentarem um crescimento estável. Após esse período foram suspensas as regas para iniciar o acompanhamento de resistência à seca, que contemplou os meses de agosto até dezembro do ano de 2009. O objetivo deste estudo foi investigar a tolerância à desidratação de diferentes tipos de plantas e usar os resultados de observação para determinar a sua tolerância à seca, sendo as mesmas classificadas quanto a sua resistência: de crescimento esperado à morte da vegetação.

Durante o período do experimento, o mês de agosto apresentou o maior índice pluviométrico, chegando a 810 mm. Entre setembro e novembro o clima foi mais seco, somando uma precipitação total de 959 mm. Devido a essa característica, no início do experimento todas as plantas se desenvolveram bem.

Apresentaram crescimento normal como resultado as espécies das famílias: *Portulacaria*, *Kalanchoe*, *Euphoria*, conforme figura 20.

Apesar de plantas com alta tolerância à seca pertencerem a famílias diferentes e apresentarem diferentes morfologias quanto às folhas, tamanho e cor, cada uma tem seus próprios mecanismos de enfrentamento da seca para se adaptar

ao estresse ambiental. Seu ponto comum é que toda são plantas suculentas com folhas carnudas que servem como órgãos de armazenamento de água. (LIU *et al.*, 2012).

Os resultados indicam que as plantas de famílias do tipo CAM, *Portulacaceae*, *Crassulaceae*, e *Euphorbiaceae*, são mais tolerantes à seca e podem sobreviver por longos períodos sem regas artificiais. Elas são adequados para a fina camada de telhados verdes em climas subtropicais e sobrevivem apenas por chuva natural em condições de telhado em Taiwan.

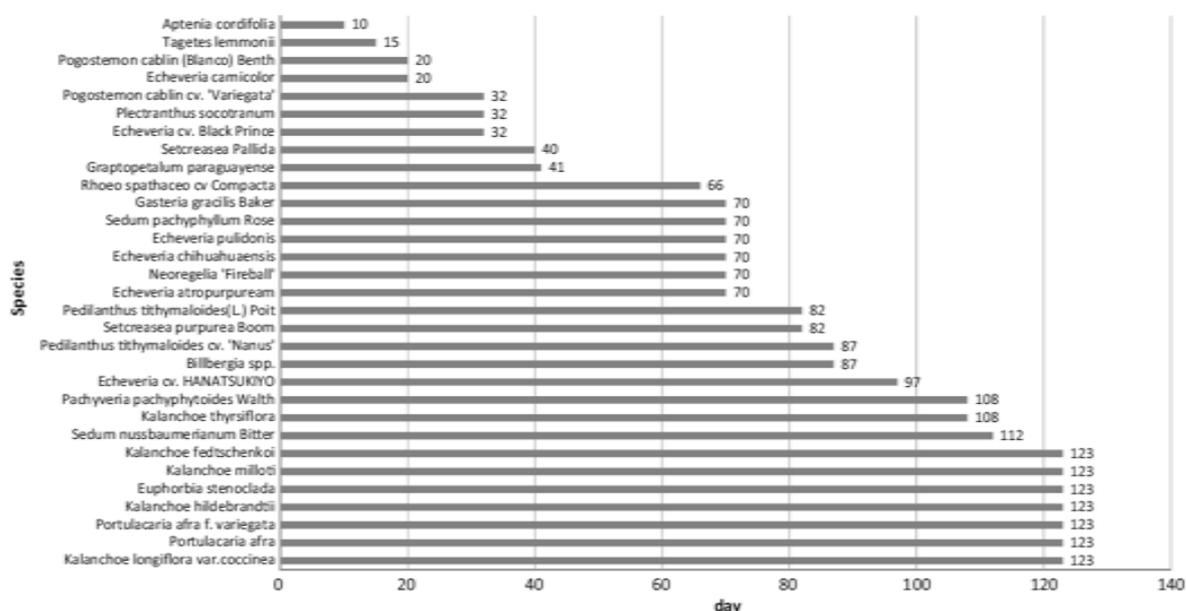


figura 20 - Dias em crescimento normal das plantas no experimento de tolerância a seca
Fonte: LIU *et al.* (2012)

Diante desses resultados, pode-se concluir que a espécie vegetal pode influenciar diretamente em algumas variáveis de análise dos telhados verdes: desempenho térmico, tanto pela coloração da vegetação quanto pelo seu porte e fechamento do solo. Desenvolvimento das espécies, através da influência da tipologia da mesma e a capacidade de resistência ao estresse hídrico.

2.4.4 Artigo 04

Alguns autores destacam a importância dos telhados verdes como mitigadores dos problemas das cidades, Berndtsson (2010) no artigo: *Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review*, destaca dois pontos principais à quantidade e qualidade da água filtrada por uma cobertura.

A presente pesquisa também adota como objeto de análise a relação qualitativa e quantitativa das águas escoadas por uma cobertura verde

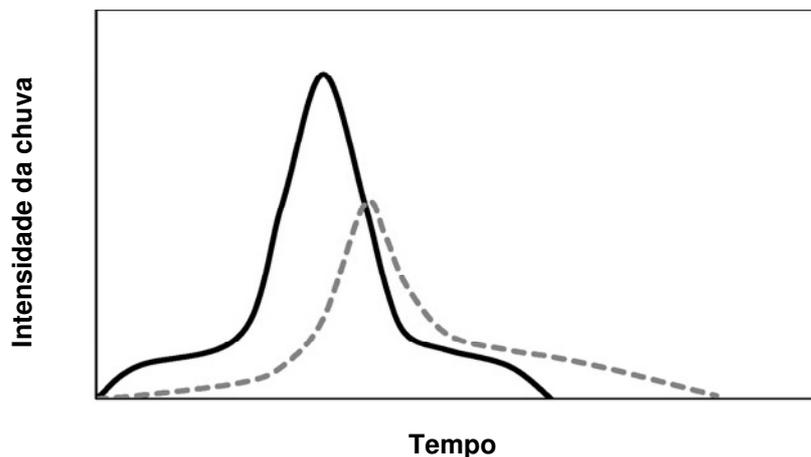
O autor destaca que a população mundial está cada vez mais concentrada em áreas urbanas. A porcentagem de população urbana mundial tem aumentado expressivamente e as áreas urbanas estão em constante expansão, em termos de espaço e densidade. Um dos efeitos da urbanização é o aumento da área de superfícies impermeáveis. Isso, por sua vez, tem inúmeras consequências para algumas infra-estruturas da cidade e do ambiente circundante. Quando há infiltração natural das águas pluviais, diminui a pressão sobre as galerias de águas pluviais. Estudos indicam que, em certas regiões, o aquecimento global pode causar aumento da frequência e intensidade das precipitações, que também levarão ao aumento das inundações urbanas (BERNDTSSON, 2010).

Segundo o autor, apenas alguns benefícios são amplamente analisados para o projeto e construção de um telhado verde e geralmente estão ligados ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Entretanto, o autor afirma que é necessário desenvolver ainda mais as aplicações dos telhados verdes de forma a otimizar os seus benefícios.

O potencial de melhorias é grande. Esta revisão abordada por Berndtsson (2010) de alguns estudos de pesquisadores dessa área, visa ressaltar quantitativamente como um telhado verde influencia a drenagem urbana no que diz respeito à quantidade de águas pluviais e qualidade.

Berndtsson (2010) destaca alguns fatores que afetam a capacidade de retenção de água da chuva dos telhados verdes relacionados à dinâmica de escoamento.

Os telhados verdes reduzem o escoamento de águas pluviais quando comparados com outros sistemas de cobertura, além de retardar o pico de vazão de água, conforme figura 21, pois os telhados detêm parte da água e começam a lançá-la apenas depois de saturado o solo. Uma porção da água fica detida e parte irá evaporar ou ser utilizada pelas plantas pela transpiração (BERNDTSSON, 2010).



**figura 21 - Exemplo de escoamento de um telhado verde (linha tracejada) gerado por um dado evento de chuva (linha preta).
Fonte: BERNDTSSON(2010)**

Entretanto, essa capacidade de retenção irá alterar em função de alguns fatores, de acordo com Berndtsson (2010):

1. Características dos telhados verdes: camadas, tipo de material, espessura do substrato, tipo de vegetação, geometria do telhado, inclinação, posição solar (sombreamento, direção, face, etc.), idade do telhado, entre outros;
2. Condições climáticas: características da estação - período de seca, de chuva, temperatura do ar, condições de vento e umidade.

Berndtsson (2010) destaca que as propriedades do solo, bem como as condições de umidade antes de evento de chuva, são cruciais para a quantidade de água que será detida e, finalmente, que parte do escoamento será reduzida.

Desta forma, o autor ressalta que os valores em % obtidos em um estudo dificilmente podem ser comparados com outro. Assim, conforme a tabela 2, os valores variam de acordo com cada pesquisa.

tabela 2 - Água da chuva retida em telhados verdes

| Referência | Água da chuva retida no telhado verde durante o período de estudo % | Água da chuva retida nos telhados verdes: intervalo dos eventos % | Duração do período de estudo |
|---------------------------------|---|---|------------------------------|
| Bengtsson <i>et al.</i> (2005) | 46 | - | 15 meses |
| VanWoert <i>et al.</i> (2005) | 60.6 | - | 17 meses |
| De Nardo <i>et al.</i> (2005) | 45 | 19-98 | 2 meses |
| Moran <i>et al.</i> (2005) | 63 | - | 18 meses |
| Moran <i>et al.</i> (2005) | 55 | - | 15 meses |
| Carter e Rasmussen (2006) | 78 | 39-100 | 13 meses |
| Monterusso <i>et al.</i> (2004) | 48 | - | 4 eventos de chuva |
| Bliss <i>et al.</i> (2009) | - | 5-70 | 6 meses |

Fonte: A autora, adaptado de Berndtsson (2010)

Alguns pesquisadores, segundo Berndtsson (2010), avaliam o retardo de escoamento proporcionado pelos telhados verdes e alguns afirmam que esse retardo é de 10 minutos, mas que pode variar conforme a intensidade da chuva, podendo chegar a 30 minutos. Baldessar (2012) afirma que, dependendo da intensidade e durabilidade da chuva, telhados verdes planos não apresentarão nenhum tipo de escoamento, retendo 100% da água.

Berndtsson (2010) traz ainda um estudo que demonstra que a redução de escoamento de um telhado verde, com uma precipitação de 4,3mm/h foi de 1,9mm e atrasaram o pico de escoamento em 2 horas (DENARDO *et al.*, 2005 *apud* BERNDTSSON, 2010).

Os substratos e as vegetações também são importantes para a capacidade de escoamento de água pluvial de um telhado verde. Segundo Berndtsson (2010), alguns autores afirmam que os substratos possuem influência maior que as vegetações, principalmente com a variação de espessura destes. Entretanto, as vegetações desempenham um papel importante, principalmente em períodos de baixa disponibilidade de água e altas temperaturas.

Outro fator que irá influenciar o desempenho de escoamento de água da chuva é a idade do telhado. Com o passar do tempo, o substrato dos telhados verdes sofrem uma série de variações físicas e químicas e aumenta expressivamente a quantidade de matéria orgânica, o que influencia na porosidade da cobertura (BERNDTSSON, 2010).

Getter *et al.* (2007 *apud* BERNDTSSON, 2010) compararam o teor de matéria orgânica e propriedades físicas do solo após 5 anos em um telhado verde. Os autores descobriram que o teor de matéria orgânica e de espaço porosos/vazios duplicou em um período de tempo (de 2% a 4% e de 41% para 82%, respectivamente). A capacidade de retenção de água aumentou de 17% para 67%.

A retenção do telhado verde depende também da estação do ano. Estações mais quentes, como o verão, resultam em maior evapotranspiração das plantas. Desta forma, aumenta também a capacidade de retenção de água da chuva (BERNDTSSON, 2010).

Os diferentes estudos sobre a influência da capacidade de retenção em telhados verdes trazem resultados diferentes: enquanto alguns estudos não encontram nenhuma correlação entre a inclinação do telhado e o escoamento, outros observam que a retenção da água pode depender diretamente da inclinação (BERNDTSSON, 2010).

Outra análise de Berndtsson (2010) é quanto a qualidade da água da chuva escoada. O autor destaca alguns fatores que afetam a qualidade da água escoada.

Muitos pesquisadores citam como benefício dos telhados verdes a capacidade de filtrar a água da chuva. Entretanto, é importante verificar alguns itens para saber qual a qualidade dessa filtragem. Segundo Berndtsson (2010), pouca atenção tem sido dada a essa qualidade da água da enxurrada. Na tabela 3 pode ser verificado o resultado de alguns estudos referentes à qualidade da água.

tabela 3 - Concentração de nutrientes no escoamento de água da chuva em telhados verdes

| Referências | Unidade | N-tot | NO ₃ -N | NH ₄ -N | P-tot | PO ₄ -P |
|---|---------|---------|--------------------|--------------------|-------------|--------------------|
| Teemusk e Mander (2007) | | | | | | |
| | mg/l | | | | | |
| Precipitação | | 0,6–1,3 | 0,18–0,09 | <0,015–0,22 | 0,012–0,019 | 0,003–0,004 |
| Escoamento da chuva | | 1,2–2,1 | 0,42–0,8 | 0,12–0,33 | 0,026–0,09 | 0,006–0,066 |
| Escoamento de degelo | | 0,2–1,1 | 0,33–<0,03 | 0,17–0,35 | 0,034–0,056 | 0,011–0,028 |
| Moran <i>et al.</i> (2005) | | | | | | |
| | mg/l | 0,8–6,8 | | | 0,6–1,5 | |
| Monte Russo <i>et al.</i> (2004) | | | | | | |
| | µg/l | | | | 0,46–4,39 | |
| Czemiel Berndtsson <i>et al.</i> (2009) (average values) | | | | | | |
| Precipitação | mg/l | 2,65 | 1,03 | 1,08 | 0,04 | 0,02 |
| Escoamento da chuva | mg/l | 2,31 | 0,07 | 0,08 | 0,31 | 0,27 |
| Escoamento de degelo | mg/l | 0,59 | 0,11 | 0,15 | 0,01 | 0,00 |
| Bliss <i>et al.</i> (2009) | | | | | | |
| | mg/l | 0,0 | | | 2-3 | |

Fonte: A autora, adaptado de Berndtsson (2010)

Para analisar a qualidade da água, deve ser analisada a qualidade da água na fonte e a sua exposição a contaminantes durante o seu movimento nas superfícies construídas ou no solo. A água da chuva é geralmente considerada como não poluída, mas pode ser ácida e conter quantidades substanciais de nitratos, afirma Berndtsson (2010). Pode conter traços de outros poluentes, por exemplo, metais pesados e pesticidas, dependendo das fontes de poluição local e ventos dominantes.

Abaixo, alguns dos fatores que influenciam potencialmente escoamento do telhado verde:

1. tipo de material utilizado (composição do solo, o material de drenagem e/ou material do telhado subjacente, material dos tubos de chuva);
2. espessura do solo;
3. tipo de drenagem ;

4. manutenção / produtos químicos utilizados ;
5. tipo de vegetação, estação (biomassa usando nutrientes);
6. dinâmica de precipitação ;
7. direção do vento;
8. fontes de poluição local;
9. propriedades físico-químicas dos poluentes (BERNDTSSON, 2010).

Os contaminantes mais comuns de escoamento de águas pluviais urbanas são os metais pesados, hidrocarbonetos de petróleo, pesticidas, suspensos sólidos, nutrientes e microrganismos patogênicos. Segundo o autor, a principal questão relacionada ao escoamento de água de chuva em telhados verdes é se ele aumenta ou diminui a carga de poluição urbana no escoamento. Segundo os estudos avaliados por Berndtsson (2010), existem duas formas de avaliar essa condição:

A primeira é quando se analisa se a quantidade de entrada de poluentes é maior ou menor que a quantidade de saída desses. Desta forma, um telhado é poluente se as concentrações de entrada forem menores que as concentrações de saída. Nessa condição, não é levada em consideração a redução de água durante o escoamento.

A segunda forma é quanto à massa de poluentes lançadas, ou seja, a análise é se a carga de poluentes recolhidas em uma superfície sem o telhado verde é diferente da massa recolhida depois do telhado verde (BERNDTSSON, 2010).

A carga de fósforo na água da chuva é geralmente muito pequena, entretanto ela pode ser aumentada com uso de fertilizantes no solo, alguns pesquisadores afirmam que o fósforo presente no telhado verde na maioria das vezes é liberado como fosfato. Köhler *et al.* (2002 *apud* BERNDTSSON, 2010) conclui, em relação aos fosfatos, que a redução de cargas depende da redução do volume de água no interior do telhado verde e, segundo os autores, a redução de fosfato também está ligada à vida útil do telhado verde, desta forma, ele associa a quantidade de fosfato à irrigação e à idade do telhado verde.

Outro elemento analisado pelo autor é o nitrogênio. Alguns estudos indicam que as concentrações de diversas formas de nitrogênio são mais baixas depois de passarem pelo telhado verde do que as encontradas na água da chuva antes de escoar nas superfícies, enquanto outros afirmam que a liberação de nitrogênio é mais significativa após os telhados verdes. As concentrações de nitrogênio no

escoamento do telhado verde estão ligados ao tipo de solo, à idade do telhado verde e à manutenção (uso de fertilizantes).

Quanto aos metais pesados, não existe nenhum estudo disponível que associe a liberação de metais pesados aos telhados verdes, afirma o autor. Segundo ele, em geral nenhum telhado verde mostrou influência na qualidade do escoamento superficial e na saída, entretanto, como os telhados verdes reduzem a quantidade de água escoada, a quantidade de metais também é menor (BERNDTSSON, 2010).

Os telhados verdes podem influenciar a qualidade do escoamento aumentando o pH da água para 7 ou 8 após o escoamento (BLISS *et al.*, 2009 *apud* BERNDTSSON, 2010).

O autor ainda destaca a relação com o *first flush*, ou seja, a primeira água de escoamento da superfície. Essa água geralmente é mais poluída pois ela faz a lavagem da superfície, carregando maior carga de poluição atmosférica, além de rejeitos de pássaros, restos de espécies vegetais, etc., nos telhados verdes. Esse fato também ocorre diminuindo a qualidade da água do primeiro escoamento (BERNDTSSON, 2010).

O autor ressalta ainda que muitos telhados verdes, principalmente do tipo intensivo, utilizam fertilizantes para auxiliar no desenvolvimento das espécies vegetais.

Berndtsson (2010) conclui que os telhados verdes assumem importante papel para a drenagem urbana, considerando tanto a quantidade quanto a qualidade da água, com aspectos relacionados (propriedades geométricas, tipo de solo e profundidade, vegetação e manutenção). Verifica-se que as declarações gerais sobre o potencial papel benéfico de telhados com vegetação em ambiente urbano são comuns através da literatura atual. No entanto, as evidências científicas dos vários benefícios ainda são insuficientes. Há exemplos de diferentes estudos que relatam resultados contraditórios e isso é consequência das condições específicas de cada instalação de telhado verde.

Em relação à qualidade do escoamento da água, torna-se evidente que a maior influência sobre o teor de nutrientes no escoamento superficial é a partir do material do solo (por exemplo, composto) e fertilizantes adicionados. Desta forma, é sempre importante avaliar a necessidade de fertilização do solo.

A partir disso, pode-se concluir que os telhados verdes têm a capacidade de aumentar a retenção de água da chuva em relação a outros sistemas de cobertura. Entretanto, as características da cobertura podem influenciar diretamente nessa retenção, assim como as condições climáticas locais. Desta forma, é necessário avaliar a retenção para cada cidade com condições climáticas diferentes. Na presente pesquisa, com o objetivo de verificar se as vegetações influenciam de forma significativa nessa alteração, deve-se manter constante todas as demais características do telhado verde para que se possa isolar essa variável.

Quanto a qualidade da água, destaca-se as variáveis de nitrogênio, fósforo e pH para ser observada e comparada com sistemas tradicionais de cobertura. Essas variáveis podem variar em função da composição do substrato.

2.4.5 Artigo 05

Outro fator que pode ser destacado quanto aos telhados verdes é a sua sustentabilidade. Kosareo e Ries (2006) buscam analisar de forma comparativa telhados verdes e telhados convencionais e verificar a análise de ciclo de vida envolvida no artigo: *Comparative environmental life cycle assessment of green roofs*.

Segundo Kosareo e Ries (2006), a redução de uso de energia com telhado verde não é tão grande quando analisada a energia total da construção. Essa redução é importante quando feita a análise do ciclo de vida da edificação.

Estudos que compararam telhados verdes extensivos, intensivos e telhados convencionais, verificaram que os telhados extensivos têm custo de ciclo de vida menor que os telhados convencionais, diferente dos telhados intensivos, que apresentaram custo do ciclo de vida maior (KOSAREO e RIES, 2006).

Entretanto, esse não deve ser o único fator analisado, tendo em vista que na vida útil do telhado verde intensivo muitos serão os ganhos ambientais. Desta forma, Kosareo e Ries (2006) destacam a importância da Análise do Ciclo de Vida (ACV). O objetivo da ACV é comparar os impactos ambientais e as potencialidades envolvidas na construção.

O estudo de Kosareo e Ries (2006) quanto à comparação entre três sistemas de cobertura (telhado verde extensivo, telhado verde intensivo e telhado

convencional), verificou que o telhado verde intensivo apresentou o menor consumo elétrico e de gás dentro do cenário analisado.

Os autores ressaltam ainda que a redução de escoamento de água para a laje com cascalho foi de 33%, do telhado verde extensivo de 60% e intensivo 85%, além de uma redução expressiva dos poluentes encontrados na água.

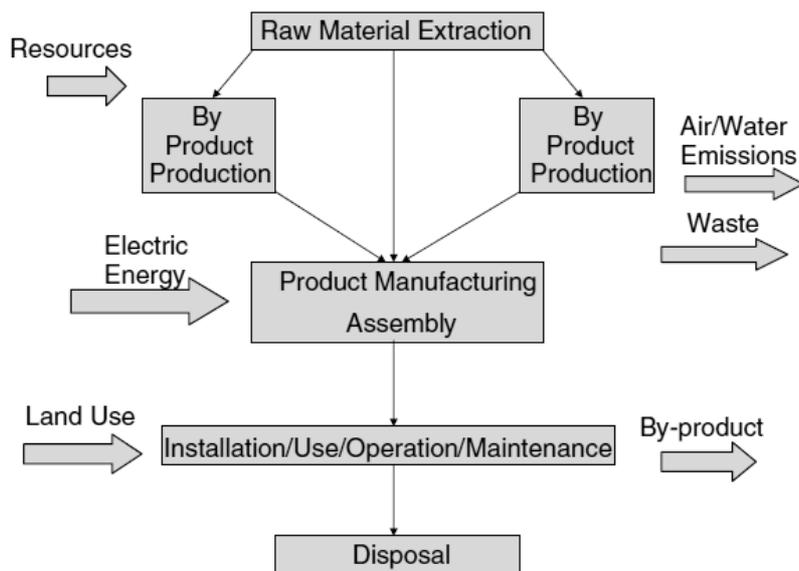


figura 22 - Visão geral do processo básico de produtos nos sistemas de coberturas alternativas. O diagrama de fluxo descreve o fluxo básico de energia, emissões e materiais. As setas pretas representam casos em que um modo de transporte serão utilizados.

Fonte: Kosareo e Rios (2006)

Na figura 23 busca-se comparar os três telhados quanto às suas emissões e os impactos em quatro pontos distintos: saúde humana, qualidade do ecossistema, mudança climática e recursos. O principal impacto de todas as coberturas é na saúde humana e se deve principalmente à eletricidade com base no carvão, afirmam Kosareo e Ries (2006).

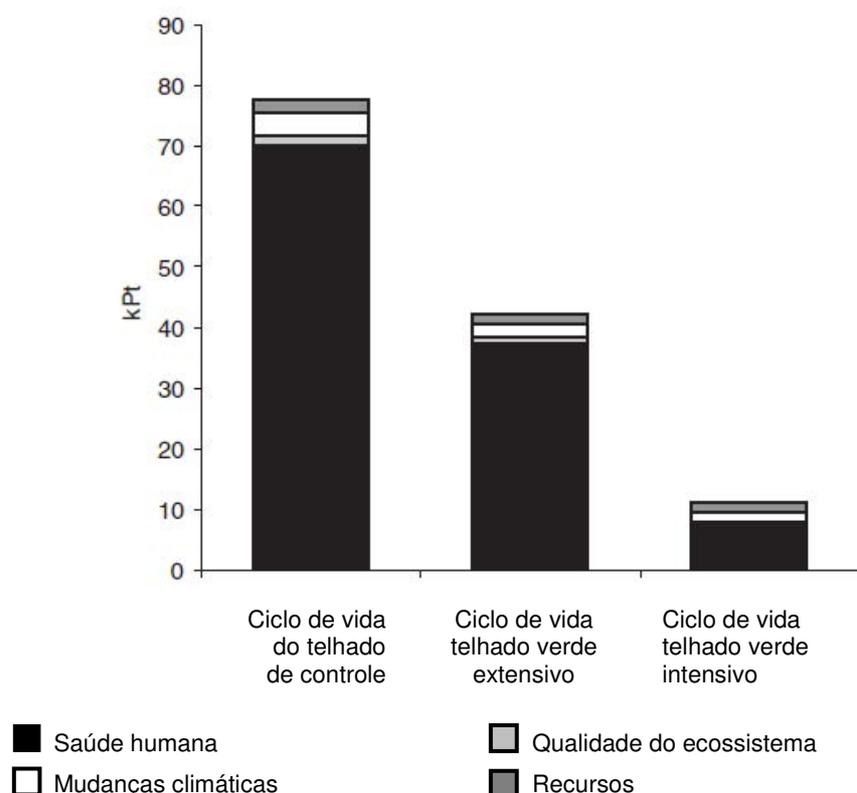


figura 23 - Resultados individuais para os três tipos de coberturas
Fonte: Kosareo e Ries (2006)

Apesar da necessidade de recursos adicionais, inicialmente os telhados verdes são a escolha ambientalmente preferível para a construção de um edifício devido à redução na demanda de energia e maior vida útil da impermeabilização da cobertura (KOSAREO e RIES, 2006).

A análise do ciclo de vida da edificação está diretamente relacionada aos materiais que a compõem. Desta forma, deve-se atentar na escolha desses materiais, podendo ser através do ciclo de vida de cada um dos materiais que o compõem. Deve-se atentar também à capacidade de conservação de energia que cada um dos telhados pode proporcionar, tendo em vista que esse é o maior impacto entre os pontos analisados.

A escolha por telhados verdes como cobertura em edificações pode representar uma série de benefícios, sejam eles para as edificações ou para o meio ambiente. Entretanto, é necessário desenvolver mais pesquisas locais com o objetivo de entender esses benefícios para cada localização com o objetivo de nortear a escolha por um ou outro tipo de telhado.

3 MÉTODO DE PESQUISA

3.1 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA (MÉTODO) DE PESQUISA

Esta pesquisa é de caráter experimental e busca avaliar, de forma comparativa, o desempenho dos telhados verdes quando variadas as espécies vegetais, com foco na análise da temperatura superficial superior e posterior nos módulos, capacidade de retenção de água da chuva e qualidade da água escoada.

Gil (2002) afirma que o “experimento representa o melhor exemplo de pesquisa científica.” Define ainda que, em sua essência, “a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”.

Moreira (2004) destaca que um experimento tem como características: “enquanto uma variável independente é manipulada, todas as outras variáveis são mantidas constantes; o efeito da manipulação da variável independente sobre a variável dependente é então observado”.

3.1.1 Unidade de análise

Esta pesquisa busca saber o desempenho dos telhados verdes quando variado o tipo de espécie vegetal, para as quatro estações na cidade de Curitiba.

A unidade de análise desta pesquisa é a variação do efeito que a escolha das espécies vegetais causa sobre um telhado verde do tipo extensivo através das seguintes variáveis: desenvolvimento das espécies, capacidade de retenção de água da chuva, desempenho térmico e qualidade da água.

3.1.2 Delimitação do trabalho

Essa pesquisa tem como objeto de estudo uma cama de teste para analisar o desempenho de telhados verdes, comparando-os com sistemas tradicionais de cobertura. A análise será feita em Curitiba com cinco protótipos de telhados verdes,

com cinco espécies vegetais diferentes. Três protótipos simulando coberturas tradicionais, cobertura de telha cerâmica, cobertura de telha de fibrocimento e laje impermeabilizada, este último também servindo como telhado de controle ou pluviômetro. Todos os sistemas tem como base chapa de compensado naval.

As variáveis analisadas serão:

1. Desenvolvimento das espécies, através da análise visual durante o período de fevereiro de 2014 até abril de 2015, através de relatórios fotográficos comparando as espécies vegetais;
2. Capacidade de retenção e qualidade da água da chuva escoada através da leitura em galões milimetrados em eventos específicos de chuva, comparando os dados obtidos de cada módulo entre eles. A análise de retenção de água de chuva foi feita durante o período de junho de 2014 até janeiro de 2015, realizando as medições na sequência de um período de chuva, sendo relatados alguns eventos nesse período;
3. Desempenho quanto à temperatura superficial dos sistemas, com instalação de termopares do tipo K, conectados ao *datalogger* do tipo TD-890 fixados na parte inferior nos módulos (fixado na base da estrutura) e na parte superior (sobre os sistemas de telhado verde), comparada com a temperatura do ar, através de eventos específicos;
4. Análise da qualidade da água através dos parâmetros: nitrogênio total (na primeira amostra) nitrogênio amoniacal (na segunda amostra) fósforo total, pH, sólidos totais e coloração.

Os protótipos foram locados lado a lado em uma mesma estrutura, para que se obtenha as mesmas condições climáticas incidindo sobre eles.

Essa pesquisa não irá abordar as variações de temperaturas dentro de ambientes, apenas a temperatura superficial, tendo em vista que esse experimento é uma cama de testes. Não será analisada a influência do substrato nas vegetações, sendo esse mantido como uma constante nos módulos. Não serão avaliadas demais variáveis de qualidade da água da chuva não citadas anteriormente. Transbordo de água de escoamento será desconsiderado na análise.

3.1.3 Justificativa da escolha a partir do objetivo

A estratégia é analisar o comportamento da cobertura verde e verificar a adaptação das vegetações ao clima subtropical da cidade de Curitiba, confrontando os dados com os dados das coberturas tradicionais e verificado seu desempenho quanto à temperatura superficial, retenção e qualidade da água.

3.1.4 Testes de validade

Robson (2011) destaca a importância da validade da pesquisa, ressaltando que a falta de confiabilidade pode ser consequência de erros do objeto, do viés do objeto, erro do observador e viés do observador. Entretanto, se a confiança for demonstrada, o autor coloca que um bom trabalho de medição será realizado.

3.1.4.1 Validade do constructo

Como o objetivo da pesquisa é analisar as variáveis do telhado verde quanto às espécies vegetais, comparando um sistema com o outro, os módulos de cobertura foram posicionados um ao lado do outro de forma a garantir as mesmas condições ambientais para todos, livres de interferências ou interferências diferentes em cada um deles.

Para garantir a comparação entre os sistemas, foi deixado um dos módulos apenas com a base impermeabilizada para funcionar como pluviômetro e ter a precipitação local exata. Foi instalado um *datalogger* para a medição da temperatura do ar junto aos módulos.

Quanto aos telhados verdes, foi alterada a variável referente às espécies vegetais. Todas as demais variáveis foram mantidas constantes para não influenciar nas medições.

Os módulos de telhado verde tiveram sua montagem feita no mesmo dia para evitar influência de precipitação ou outras condições climáticas diferentes entre eles. Além disso, a irrigação manual e a adubagem foram realizadas de forma igual e também no mesmo período em cada um dos sistemas.

Os ensaios de água, realizados em laboratório, foram executados pela mesma pessoa para evitar variações de leitura. Além disso, foi seguida a metodologia adotada como padrão dentro do laboratório. As soluções criadas para as análises utilizadas em cada bateria de testes eram iguais para todas as amostras para evitar qualquer tipo de influência sobre as espécies.

3.1.4.2 Validade interna

Para garantir a validade interna, a execução do experimento segue a sequência descrita no protocolo de coleta de dados, sendo apresentada através dos registros fotográficos e relatórios desenvolvidos ao longo da construção.

Ainda, para a validação, serão feitas comparações com modelos de coberturas tradicionais, laje impermeabilizada, telha cerâmica e telha de fibrocimento, expostos às mesmas condições que os telhados verdes, para verificar se a variação encontrada entre os módulos é significativa.

Durante as medições de temperatura foi verificado se os termopares estavam instalados corretamente e foi mantido padrão o mesmo *datalogger* para cada uma das amostras, além de garantir a instalação do *datalogger* de temperatura do ar.

Foram realizado dois testes de laboratório em água, para comparar os dados e verificar se os resultados eram convergentes.

O mesmo destaca-se para retenção de água da chuva e temperatura superficial.

3.1.4.3 Validade externa

Robson (2011) chama a validade externa de generabilidade. O autor destaca a preocupação que se deve ter na validade externa com as ameaças, principalmente quanto a qual recorte a pesquisa faz parte, seja um recorte de um grupo, de um local de abrangência, e a significância deste recorte.

O experimento desta pesquisa não será feito em laboratório, apenas os ensaios de qualidade da água, sendo que as variáveis de clima, umidade e

temperatura não são controláveis, mas acontecem igualmente entre todos os sistemas em análise.

Para garantir que o método comparativo entre os módulos fosse válido, todos foram construídos no mesmo local, com as mesmas condições climáticas. Desta forma, esse estudo tem validade para regiões que apresentem as mesmas características climáticas da cidade de Curitiba nas datas analisadas. Além disso, os materiais utilizados tiveram as suas especificações detalhadas no método de pesquisa.

3.1.4.4 Rastreabilidade

Yin (2010) destaca a importância da rastreabilidade, ou confiabilidade, de uma pesquisa, podendo outro pesquisador chegar aos mesmos resultados quando seguido o mesmo método de pesquisa.

A rastreabilidade desta pesquisa será garantida através da descrição do processo no protocolo de coleta de dados, da especificação dos materiais e equipamentos utilizados na montagem dos sistemas, além da disponibilização de dados climáticos, pluviométricos e de temperatura local utilizados para a pesquisa em questão.

Disponibilização da metodologia aplicada em laboratório para realização da análise de água.

3.2 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS

Gil (2002) afirma que “a coleta de dados, na pesquisa experimental, é feita mediante a manipulação de certas condições e a observação dos efeitos produzidos”.

Yin (2001) afirma ainda que o protocolo de coleta de dados tem a função de servir como instrumento para a sistematização das regras e procedimentos de como efetuar o levantamento de dados.

Abaixo a descrição das etapas adotadas para a elaboração dessa pesquisa.

- a) Primeira etapa: revisão bibliográfica.

Esta etapa, contemplada no capítulo 02 desta pesquisa, compreende a fundamentação do trabalho através da análise das bibliografias existentes, que se relacionam direta ou indiretamente com o tema desta dissertação. Primeiramente, abordando o conceito de telhados verdes e as suas tipologias. Na sequência, realiza-se uma análise quanto aos benefícios que esse tipo de cobertura pode trazer para as edificações e para o meio ambiente, seguida com uma abordagem sobre a composição dos telhados verdes, sua importância e as espécies vegetais que podem ser utilizadas em telhados verdes do tipo extensivo. Finaliza-se essa etapa com o estado da arte, abordando alguns dos artigos recentemente publicados sobre o tema que convergem com o tema dessa pesquisa.

b) Segunda etapa: experimento

Nessa etapa fundamentam-se as decisões sobre a construção da mesa de testes que contempla 5 telhados verdes, 2 coberturas tradicionais e 1 pluviômetro, descrevendo as características do local, o projeto e a construção do protótipo com registro fotográfico de todo o processo. Essa etapa está descrita no item e).

c) Terceira etapa: coleta de dados e resultados

Os dados serão coletados conforme medições, sendo essas registradas na forma de planilhas de coleta de dados, apresentando assim o resultado de análise da cada uma das variáveis, sendo apresentado a método de análise desses dados no item 3.4

d) Quarta etapa: análise dos resultados

Nessa etapa serão relacionados os resultados, mostrando o desempenho de cada sistema destacados nos principais eventos analisados, além do comparativo entre todos os sistemas e a melhor adaptação de cada um deles, item 4.

e) Quinta etapa: conclusão

3.3 EXPERIMENTO - CAMA DE TESTES

3.3.1 Localização

Para a montagem da cama de testes foi necessário um espaço livre de sombreamento para que a mesma pudesse ser instalada em uma altura confortável e de fácil acesso para leituras frequentes. Desta forma, optou-se por montar na

estrutura do Horto Municipal de Curitiba, que possui essa área disponível, além de segurança 24 horas (figura 24 e figura 25), o que garante maior segurança para os equipamentos utilizados.

O Horto Municipal localiza-se na cidade de Curitiba, no bairro Guabirota, na Avenida Senador Salgado Filho, 1050. É administrado pelo Departamento de Produção Vegetal, da Secretaria Municipal do Meio Ambiente e é responsável pela produção de mudas de flores destinadas às áreas públicas da cidade de Curitiba.

A Cidade de Curitiba representa hoje a oitava cidade mais populosa do Brasil (IBGE, 2010). Ainda, segundo dados do IBGE (2010), está localizada na zona de clima temperado super úmido sem seca. Já, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, Curitiba possui como tipo climático Cfb, caracterizado como temperado úmido ou sub-tropical com verão temperado, chuvas bem distribuídas e verões brandos, com temperatura média no inverno de 11°C e no verão de 23°C (SAMPAIO *et al.*, 2011).

Conforme as normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2015) destaca-se que Curitiba possui uma precipitação anual média de aproximadamente 1500mm e temperatura média de 16,8°C (1961-1990), conforme tabela 4.

tabela 4 - Normais climatológicas Curitiba (1961 - 1990)

| | UN | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | ANO |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Temp. Média | ° C | 20,4 | 20,6 | 19,6 | 17,2 | 14,5 | 13,1 | 12,9 | 14,1 | 15,0 | 16,5 | 18,2 | 19,3 | 16,8 |
| Temp. Mín | ° C | 16,4 | 16,3 | 15,4 | 12,8 | 10,2 | 8,4 | 8,1 | 9,2 | 10,8 | 12,5 | 14,0 | 15,4 | 12,5 |
| Temp. Máx | ° C | 26,6 | 26,7 | 25,7 | 23,1 | 21,1 | 19,6 | 19,4 | 20,9 | 21,3 | 22,6 | 24,5 | 25,4 | 23,1 |
| Pressão Atm. | hPa | 909,4 | 910,3 | 911,2 | 912,4 | 913,4 | 914,3 | 915,1 | 914,0 | 913,3 | 911,6 | 910,1 | 909,4 | 912,0 |
| Precipitação | mm | 171,8 | 157,6 | 138,8 | 94,8 | 101,0 | 115,6 | 98,8 | 73,4 | 119,2 | 133,3 | 126,9 | 152,3 | 1483,4 |
| Umid. Rel. | % | 79,0 | 80,0 | 80,0 | 79,0 | 82,0 | 82,7 | 81,0 | 79,0 | 82,0 | 82,0 | 80,0 | 82,0 | 80,7 |
| Evaporação | mm | 79,0 | 67,7 | 68,7 | 58,9 | 57,8 | 58,1 | 68,1 | 79,9 | 69,5 | 71,2 | 84,1 | 80,4 | 843,4 |
| Insolação | horas | 184,4 | 160,8 | 172,0 | 164,2 | 178,3 | 160,2 | 173,4 | 175,4 | 134,1 | 155,5 | 177,0 | 170,9 | 2006,2 |

Fonte: A autora, a partir de dados Inmet (2015)



figura 24 - Horto Municipal de Curitiba
Fonte: Google Earth (2014)



figura 25 - Local de Inserção da mesa de testes
Fonte: Google Earth, adaptado pela autora (2014)

3.3.2 Projeto da cama de testes

O projeto arquitetônico da cama de testes contemplou 14 módulos, sendo 5 módulos de telhados verdes com variação de espécies vegetais, 5 módulos com variação da composição de substratos e mesma vegetação utilizada por Muller (2014), dois protótipos de coberturas tradicionais (telha cerâmica, telha de fibrocimento) e, por fim, dois módulos de laje impermeabilizadas que cumprem também a função de pluviômetro (figura 26, figura 27, figura 28, figura 29 e figura 30).



figura 26 - Perspectiva do protótipo
Fonte: A Autora (2013)



figura 27 - Perspectiva do protótipo
Fonte: A Autora (2013)



figura 28 - Perspectiva do protótipo
Fonte: A Autora (2013)



figura 29 - Perspectiva do protótipo
Fonte: A Autora (2013)



figura 30 - Perspectiva do protótipo
Fonte: A Autora (2013)

A figura 31 apresenta o corte desse sistema e toda a composição do mesmo. No apêndice A desta pesquisa é possível verificar todo o projeto executivo da estrutura.

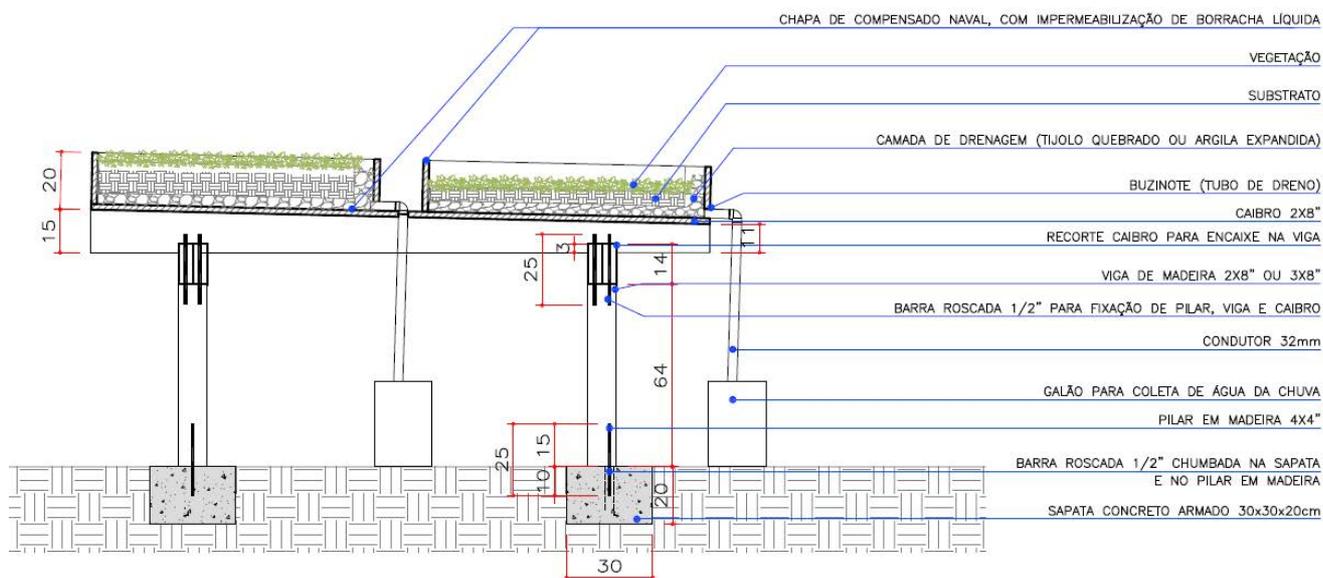


figura 31 - Corte do protótipo
Fonte: A Autora (2013)

Toda a cama de teste possui uma inclinação de 2% para garantir o escoamento da água da chuva (figura 31 e figura 33).

Em cada um dos módulos foi prevista uma saída de água para a drenagem do sistema ligado a um recipiente graduado para a leitura da captação da água de chuva, conforme figura 33.



figura 32 - Mesa de teste de telhados, demonstrado a inclinação prevista para os módulos
Fonte: A Autora (2013)



figura 33 - Sistema de Captação de água da Chuva
Fonte: A Autora (2013)

3.3.3 Montagem da mesa de testes

Optou-se por um sistema de cobertura com uso de madeira, ao invés de laje de concreto armado. Roaf *et al.* (2006) discorrem sobre o uso da madeira nas edificações e destacam como um dos principais atributos desse material a capacidade de redução na quantidade de CO₂ na atmosfera. Entretanto, os autores destacam ainda que se deve observar de onde vem a madeira, devido à emissão de CO₂ no transporte desse material, e se é certificada.

A partir disso, optou-se pelo uso de chapa de compensado estrutural para a base do sistema, pois a mesma é feita com madeira com certificado de reflorestamento e de produção próxima. As demais madeiras utilizadas para o vigamento do sistema foram de reaproveitamento auxiliando, dessa forma, na sustentabilidade do sistema.

Para suporte da estrutura no terreno disponível foram construídas 8 sapatas de concreto, conforme o projeto estrutural, com as dimensões de 30x30cm e 20 cm de altura, conforme figura 34. Em cada sapata foi chumbada uma barra roscada de aço galvanizada com bitola de 1/4" para fazer a conexão com a estrutura de pilares de madeira (figura 34). Os pilares foram furados com broca adequada e para a

fixação foi aplicado adesivo estrutural de base epóxi e secagem rápida, indicado para a fixação de materiais como concreto, madeira e aço.



figura 34 - Instalação dos pilares em madeira nas sapatas de concreto
Fonte: A Autora (2013)

Conforme citado, as madeiras utilizadas para a base do sistema foram reaproveitadas. Assim, as madeiras foram primeiramente identificadas (figura 35), limpas (figura 36) e cortadas previamente (figura 37 e figura 38), tendo os pilares uma altura de 50 cm e as vigas de madeira altura média de 20 cm. Por se tratar de um material de reaproveitamento, as vigas tinham uma variação de altura, sendo essas compensadas com calços, deixando, desta forma, todas com o mesma altura quando instaladas.



figura 35 - Identificação das vigas e pilares conforme projeto
Fonte: A Autora (2013)



figura 36 - limpeza e identificação das vigas e pilares
Fonte: A Autora (2013)



figura 37 - Corte das madeiras conforme projeto
Fonte: A Autora (2013)



figura 38 - Corte das madeiras conforme projeto
Fonte: A Autora (2013)

Todo o protótipo possui uma inclinação de 2% no sentido transversal do sistema, com essa inclinação na orientação noroeste.

Sobre esse sistema estrutural de sapatas de concreto, pilares e vigas de madeira foi fixada a base dos módulos, compondo uma grande mesa. A estrutura dos módulos foi feita com compensado de *pinus* naval, composto de lâminas de *pinus* de reflorestamento e resina fenol-formaldeído, sendo um material a prova d'água, com espessura de 20 mm e chapas de comprimento de 2,44m x1,22 m (figura 39). Todas as peças que compõem os módulos (fundo e lateral) vieram cortadas de fábrica nas dimensões previstas em projeto, sendo necessário apenas parafusar o sistema *in loco* (figura 40). Primeiramente a base foi parafusada nas vigas (figura 41) e, na seqüência, as laterais do módulos fixadas uma na outra com cantoneiras em 90°, garantindo o esquadro entre elas, e por fim fixadas na base também com cantoneiras em 90° (figura 42).



figura 39 - Chapa de compensado de *pinus* naval
Fonte: Global Wood (2014)



figura 40 - Chapas de Compensado cortadas de fábrica
Fonte: A Autora (2013)



figura 41 - Montagem da mesa de testes
Fonte: A Autora (2013)



figura 42 - Fixação da estrutura lateral dos módulos
Fonte: A Autora (2013)

Com o corte das madeiras, as laterais da chapa de compensado ficaram expostas, sendo necessária a aplicação de um selador de borda a base de resinas acrílicas, pigmentos orgânicos e inorgânicos, coalescentes, espessantes, surfactantes, e cargas minerais (figura 43).

Os módulos foram instalados com distanciamento entre eles de 2,5cm. O objetivo dessa distância é eliminar a influência térmica de um módulo sobre o outro, sendo colocado um poliestireno expandido (EPS) entre os módulos devido à sua capacidade de isolamento térmico (figura 44).



figura 43 - Selador de borda
Fonte: Global Wood (2014)



figura 44 - Bordas seladas e EPS colocado
Fonte: A autora (2013)

A drenagem de cada módulo é independente e realizada através de um tubo de PVC de 3/4" na parte inferior do módulo, no nível mais baixo de cada módulo (figura 45). Para verificar o melhor local de instalação da drenagem foi despejado um litro de água e verificada a direção do escoamento do módulo, no sentido da inclinação. Esse tubo foi instalado antes da impermeabilização, para que esta pudesse envolver o tubo de queda e evitar infiltrações pelo tubo de drenagem.



figura 45 - Sistema de drenagem dos módulos
Fonte: A autora (2014)



figura 46 - Instalação do sistema de coleta de água da chuva
Fonte: A autora (2014)

A partir disso, iniciou-se a etapa de impermeabilização, na qual foi utilizado um sistema de borracha líquida, que é um nanocompósito formado pela combinação de borracha modificada e um silicato lamelar com dimensões nanométricas, conforme informações do fabricante.

Nos encontros entre chapas e nos parafusos foi aplicada uma massa composta de borracha líquida e pneu moído com a função de fechar todas as frestas do sistemas, aplicada em todos os encontros das chapas de compensado (figura 47 e figura 48). Na seqüência, com rolo de lã e pincel largo, foi aplicada a borracha líquida em todas as laterais e fundo de cada módulo, sendo repetido esse procedimento mais uma vez, para garantir a cobertura de toda a superfície (figura 49 e figura 50).



figura 47 - Composto para fechar frestas
Fonte: A autora (2013)



figura 48 - Vedação nos encaixes das caixas
Fonte: A autora (2013)



figura 49 - Impermeabilização fundo do protótipo
Fonte: A autora (2013)



figura 50 - Impermeabilização laterais do protótipo
Fonte: A autora (2013)

3.3.4 Montagem dos módulos de telhado verde

Os módulos de telhado verde são compostos das seguintes camadas: manta antirraízes, camada de drenagem, manta de contenção de substrato, substrato e vegetação. Para a proteção antirraízes, foi instalada nos módulos de telhados verde uma manta de polietileno de alta densidade, com espessura de 0,5mm, que se caracteriza por ser um termoplástico derivado do eteno com densidade igual ou maior que $0,941\text{g/cm}^3$. Esta resina tem alta resistência ao impacto, inclusive em baixas temperaturas, e boa resistência contra agentes químicos e raios solares. Ela cumpre a função de conter as raízes das vegetações para que as mesmas não penetrem na impermeabilização.



figura 51 - Manta de PEAD - camada antirraízes
Fonte: A autora (2013)

Sobre essa camada foi disposta a camada de drenagem, que foi executada com argila expandida com espessura média de 4 cm (figura 52). A escolha pela argila expandida se deu devido ao seu peso, que é muito inferior ao peso de pedra britada, além de apresentar formato arredondado que prejudica menos a camada antirraízes do sistema (figura 53). Não foi utilizado nenhum sistema de retenção de água da chuva pois o objetivo é verificar a resistência ao estresse hídrico das plantas e a capacidade de retenção no substrato e na vegetação, sem influência do sistema.



figura 52 - Camada de drenagem com 4 cm de espessura
Fonte: A autora (2013)



figura 53 - Colocação de argila expandida nos módulos de telhado verde
Fonte: A autora (2013)

Por definição, a argila expandida é um agregado de origem mineral com uma densidade de partícula não superior a 2000 kg/m³ ou uma densidade aparente solta não superior a 1200 kg/m³. É feita a partir de matérias-primas naturais, como barro, ardósia, xisto, etc., e de subprodutos industriais como cinzas volantes, cinzas de escória, etc. (SHAFIGH *et al.*, 2014). Foi utilizada a argila com granulometria de 22 a 32 mm, equivalente a brita 2.

Sobre a drenagem foi instalada uma manta geotêxtil não tecida que cumpre a função de contenção do substrato, conforme figura 54.



figura 54 - Colocação da manta geotêxtil
Fonte: A autora (2013)

Imediatamente acima da camada do geotêxtil foram dispostos os elementos do substrato, composto de: turfa, vermiculita, casca de arroz carbonizada e terra preta. De acordo com Muller (2014) a composição com 35% de terra, 20% de turfa, 40% de casca de arroz carbonizada e 5% de vermiculita, apresentou o melhor desenvolvimento das plantas, assim como a maior retenção de água da chuva, característica importante para auxiliar a sobrevivência das espécies vegetais em época de estiagem. Farrell *et al.* (2012) afirmam que quanto maior a capacidade de retenção de água da chuva, maior sobrevivência das plantas. A partir desse estudo, optou-se pela mesma composição de substrato para os 5 módulos de telhado verde.

A camada de substrato utilizada foi de 10 cm, que se caracteriza por um telhado verde do tipo extensivo.



figura 55 - Argila expandida, vermiculita, turfa e casca de arroz carbonizada
Fonte: A Autora (2013)



figura 56 - Colocação de substrato no módulo de telhado verde
Fonte: A Autora (2014)

Sobre a camada de substrato foi realizado o plantio das 5 espécies vegetais escolhidas para o experimento.

A primeira delimitação para escolha das espécies vegetais a serem inseridas no telhado verde foi que tivessem características diferentes como, porte, rapidez de crescimento, capacidade de retenção de água e coloração, pois conforme estudo de Liu *et al.* (2012) características como densidade, coloração e altura da vegetação influenciam na temperatura da cobertura.

Todas as plantas se caracterizam por serem do tipo perene, ou seja, espécies vegetais cujo ciclo de vida é longo, permitindo viver por mais de dois anos, por mais de dois ciclos sazonais. Essa característica da planta é fundamental para reduzir a manutenção dos telhados verdes.

Liu *et al.* (2012) destacam que as plantas de folhas verdes tem efeito na redução de temperatura superior às plantas de folhas vermelhas e roxas. Sendo assim, optou-se por três espécies de folhas verdes e duas de folha roxas para verificar essa variação de temperatura entre espécies com colorações diferentes.

Liu *et al.* (2012) afirmam ainda que as plantas do tipo CAM (Metabolismo do Ácido das Crassuláceas) são as mais indicadas para telhados verdes, devido à sua capacidade de armazenar ácidos em suas folhas ou partes aéreas, o que auxilia na resistência das plantas em período de estiagem. Segundo o INMET (2014), Curitiba se caracteriza por um clima chuvoso e moderadamente úmido, com índice

pluviométrico médio de 1500 mm por ano. A partir disso optou-se por plantas tanto do tipo CAM, ou seja, suculentas, quanto do tipo C3 e C4.

A primeira espécie vegetal escolhida foi a *Bulbine frutescens*, popularmente conhecida como bulbine. Segundo Lorenzi (2013), a bulbine é uma herbácea, perene e suculenta, originária da África do Sul, com altura de 20 a 30 cm. Caracteriza-se por folhas longas, cilíndricas, carnosas e cerosas, sendo composta de tufos com inflorescência no centro desses, com flores pequenas e amareladas que aparecem ao longo de todo o ano. Lorenzi (2013) destaca que é uma planta tolerante ao frio e com pouca exigência de água, característica ideal para telhados verdes na região de Curitiba. Sua multiplicação é por touceiras, sendo pouco alastrante. É uma vegetação de sol pleno e que gosta de solo rico em matéria orgânica e bem permeável (figura 57 e figura 58).



figura 57 - *Bulbine frutescens*
Fonte: LORENZI (2013)



figura 58 - *Bulbine frutescens*
Fonte: LORENZI (2013)

A segunda espécie selecionada (figura 59 e figura 60) é a *Tradescantia zebrina* variação *Purpusii*, denominada popularmente por trapoeraba roxa, trapoeraba zebrina ou lambari roxo. Caracteriza-se também por uma vegetação suculenta originária do México. Possui coloração roxa escura quando ao pleno sol. Suas folhas são carnosas e coloridas, variando do tom verde ao tom roxo escuro. A sua escolha se deu devido a sua colocação, e por se caracterizar, segundo Lorenzi (2013), por ser uma planta rústica que não exige nem podas nem contenções. Entretanto não é resistente a geadas, podendo ter suas folhas queimadas. Devido ao seu fácil enraizamento, pode rebrotar sem a necessidade da troca das mudas quando atingida pela geada. Sua multiplicação é feita através de estacas e pela ramagem rasteira enraizada.



**figura 59 - *Tradescantia zebrina*
variação *Purpusii*.
Fonte: LORENZI (2013)**



**figura 60 - *Tradescantia zebrina* variação *Purpusii*
Fonte: LORENZI (2013)**

A terceira espécie não é uma suculenta, mas é uma vegetação muito utilizada em telhados verdes no Brasil; a aplicação dela é para verificar sua adaptação ao clima do sul do Brasil, tendo em vista que é nativa do país. *Arachis repens*, conhecida como grama amendoim (figura 61 e figura 62), caracteriza-se por ser uma herbácea reptante, perene, com altura de 20 a 30 cm, com ramagem prostrada e fina, de nós e entrenós destacados. Suas folhas são pequenas e em pares com 2 a 3 cm de comprimento. No verão e na primavera brotam pequenas flores amarelas solitárias. É uma excelente planta para ser utilizada como forração em pleno sol, substituindo gramados; gosta de solo úmido e rico em matéria orgânica, afirma Lorenzo (2013), é de fácil multiplicação e tolera bem a seca, mas não a geada (PATRO, 2013).



figura 61 - *Arachis repens*
Fonte: LORENZI (2013)



figura 62 - *Arachis repens*
Fonte: LORENZI (2013)

A quarta espécie selecionada é o *Sedum mexicanum*, conhecido como sedum ou estrelinha gorda. É uma espécie utilizada com muita frequência em telhados verdes na Europa devido a sua grande tolerância ao frio. Caracteriza-se por ser uma planta do tipo suculenta de coloração verde amarelada. Apesar de ser uma suculenta, é bem adaptada a regiões de clima ameno e úmido, resistente a solos de baixa fertilidade e arenosos, sendo indicada para regiões subtropicais (LORENZI, 2013). Os seduns, de forma geral, têm como principal característica a alta resistência ao estresse hídrico, característica importante para reduzir a manutenção dos telhados verdes. Sua escolha se deu devido à sua coloração verde amarelada, sua característica como suculenta e por proporcionar um fechamento denso do solo, mesmo que de forma lenta (figura 63 e figura 64).



figura 63 - *Sedum mexicanum*
Fonte: LORENZI (2013)



figura 64 - *Sedum mexicanum*
Fonte: LORENZI (2013)

Por fim, a última espécie escolhida foi o popularmente conhecido dinheiro em penca (*Callisia repens*). É uma planta herbácea e rasteira, de pequeno porte, alcançando apenas 5 a 25 cm de altura, conforme figura 65 e figura 66. Ela apresenta folhagem densa e muito ornamental, formada por caule ramificado, filamentosos e comprido, de coloração arroxeada e numerosas folhas serosas, delicadas, pequenas e verde-arroxeadas (PATRO, 2013). É freqüentemente cultivada como forração em meia sombra. Quando cultivada em meia sombra, suas folhas apresentam coloração esverdeada e quando cultivadas ao sol apresentam folhas menores, mais adensadas e com coloração arroxeada (LORENZI, 2013).



figura 65 - *Callisia repens*
Fonte: LORENZI (2013)



figura 66 - *Callisia repens*
Fonte: LORENZI (2013)

Com essas vegetações conseguimos espécies com características adequadas para o plantio em telhados verdes do tipo extensivo, mas com características distintas como: coloração, porte, fechamento do solo, estrutura e crescimento, para poder avaliar a influência dessas características no desempenho térmico da edificação.

O plantio foi efetuado no dia dez de fevereiro de dois mil e quatorze. Foram colocadas as mesmas quantidades de mudas, com o objetivo de ter o mesmo fechamento no solo e verificar o crescimento das plantas e a capacidade de cobrimento do solo. Na figura 68 e figura 67 é possível verificar os módulos no dia do plantio.



figura 67 - Dia do plantio das mudas 10/02/2014
Fonte: A Autora (2014)

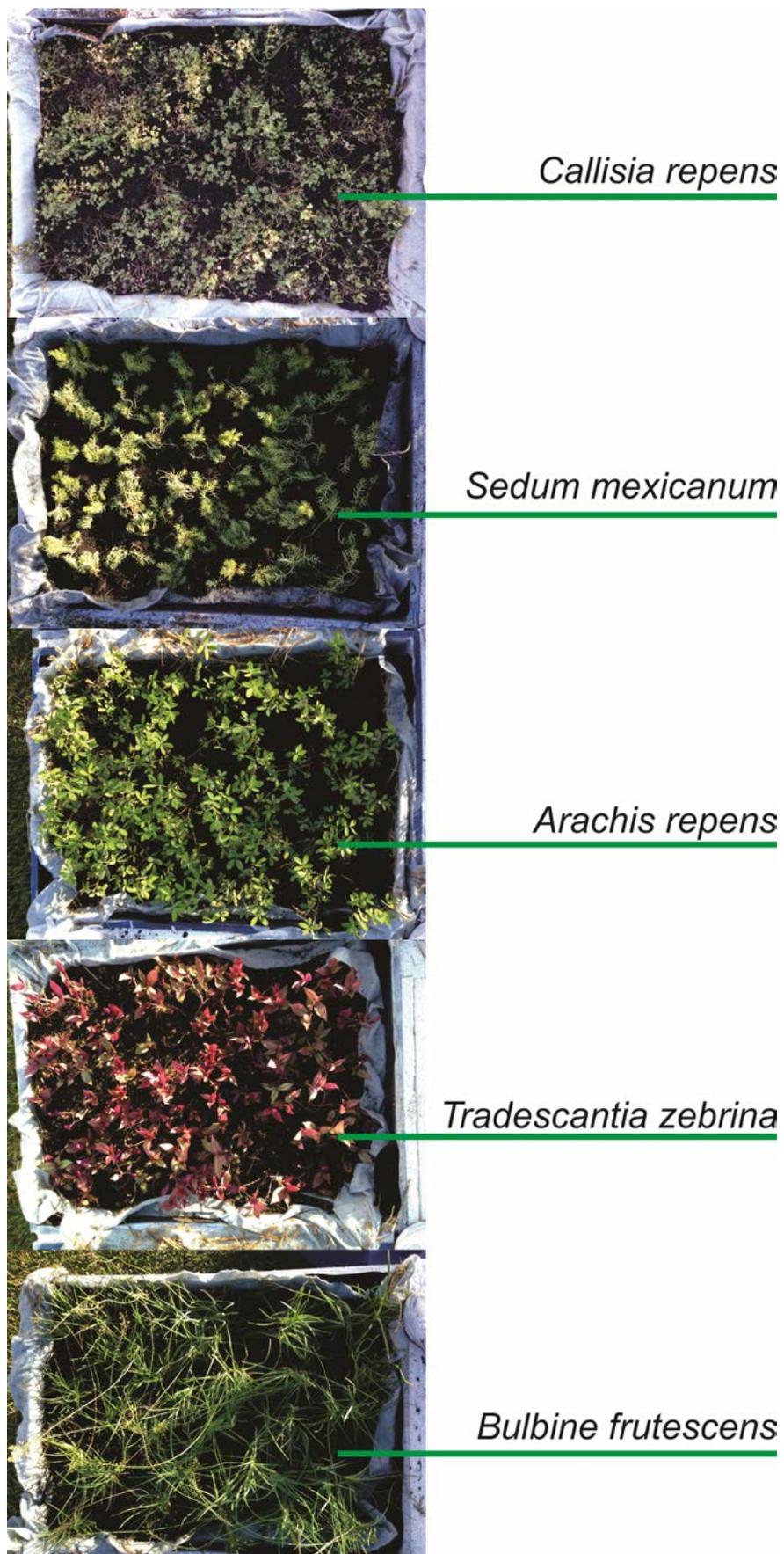


figura 68 - Dia do plantio das mudas 10/02/2014
Fonte: A Autora (2014)

3.3.5 Montagem dos módulos de coberturas tradicionais

O módulo a ser utilizado como pluviômetro foi finalizado apenas com a camada de impermeabilização, pois tem a função de escoar toda a água da chuva, para que possa ser comparado diretamente com os demais módulos quanto à quantidade de água retida (figura 69).



figura 69 - Módulo impermeabilizado - pluviômetro
Fonte: A Autora (2014)

Um dos módulos simula uma cobertura com telha do tipo cerâmica. Segundo a ABNT (NBR 13582/2002), que regula sobre as telhas do tipo romana, a inclinação mínima para esse tipo de cobertura é de 30%. Como os módulos possuem altura de 20 cm, não seria possível fazer a inclinação indicada por norma. Desta forma, adaptou-se o módulo, inserindo uma estrutura em compensado plastificado, à prova d'água, dispensando a impermeabilização. O compensado é composto de lâminas de *pinus* de reflorestamento e resina fenol-formaldeído e filme fenólico (GLOBAL WOOD, 2014). O selamento entre o encontro das duas chapas foi feito com silicone. Para a fixação da chapa foram utilizadas chapas e cantoneiras metálicas parafusadas, conforme figura 70.

Foram utilizados dois caibros (2x2") nas duas laterais longitudinais para fixar as ripas (2x1") que suportam as telhas romanas. Os caibros foram posicionados com inclinação de 30% e sobre eles instaladas as ripas com distanciamento adequado

para instalação das telhas, que possui caimento no sentido do ralo do módulo, conforme figura 71. Sobre as ripas foram colocadas as telhas romanas. As telhas cerâmicas, quando novas, possuem uma absorção maior de água devido a abertura dos poros. Desta forma, para simular da melhor forma uma cobertura ao longo da sua vida útil, foram utilizadas telhas com 12 anos de uso, conforme pode ser verificado na figura 72.



figura 70 - fixação de chapa de compensado
Fonte: A Autora (2014)



figura 71 - fixação de caibros e ripas para sustentação das telhas cerâmicas
Fonte: A Autora (2014)



figura 72 - módulo de telhado cerâmico
Fonte: A Autora (2014)

Um dos módulos recebeu uma cobertura de fibrocimento, conforme figura 75, com 4 mm de espessura e com inclinação de 15%. Para fazer a inclinação adequada foram utilizados dois caibros (2x2") que fixaram duas ripas (2x1") (figura 73 e figura 74) local onde foram pregadas as telhas, com pregos próprios para telhas do tipo de fibrocimento.



figura 73 - Detalhe do ralo, módulo telhado de fibrocimento
Fonte: A Autora (2014)



figura 74 - Fixação de caibro para apoio da telha de fibrocimento
Fonte: A Autora (2014)



figura 75 - Módulo com cobertura de telha de fibrocimento
Fonte: A Autora (2014)

Na figura 76 é possível ver todo o sistema montado, composto de 5 telhados verdes com espécies vegetais diferentes, um módulo de pluviômetro (apenas impermeabilizado) um módulo de telha de fibrocimento, um módulo de telha cerâmica tipo romana e 6 módulos para análise de variação de substrato, não contemplada nesse estudo.



figura 76 - Mesa de testes para experimento
Fonte: A Autora (2014)

3.4 MÉTODO DE ANÁLISE DE DADOS.

Foram coletados quatro conjuntos distintos de dados ao longo da pesquisa.

O primeiro deles foi quanto à análise do desenvolvimento das espécies. Essa análise foi realizada de forma visual, verificando o fechamento do solo proporcionado pelas espécies, a capacidade de desenvolvimento de cada uma delas e o suporte ao estresse hídrico, ou seja, a capacidade de sobreviver sem irrigação artificial, mantendo-se apenas com a precipitação natural.

A segunda análise foi quanto à retenção de água de chuva de cada um dos protótipos com o objetivo de verificar a retenção e a evapotranspiração dos sistemas de telhado verde comparado com sistemas tradicionais.

A coleta de dados foi realizada em dias posteriores à precipitação de alguns eventos específicos. Para o armazenamento da água de chuva, cada um dos

módulos possui um coletor transparente graduado (figura 77), que permite fazer a leitura da quantidade de água que o mesmo escoou (figura 78), com capacidade de armazenamento de 20 litros, ou seja, 26,67mm de precipitação no módulo de 75cmx100cm. Essas informações são anotadas em tabelas, conforme apêndice B, para depois comparar os dados entre si. Foram avaliados eventos de chuva de junho de 2014 a janeiro de 2015, dias com precipitação superior aos 26,67mm serão anotados na tabela como "transbordo". Os demais dados serão comparados entre si (dados dos telhados verdes).

As primeiras análises foram feitas primeiramente no módulo impermeabilizado e nos de telhado verde (eventos 1 ao 10) e nas análises posteriores foram considerados os 8 módulos distintos (eventos 11 ao 13). Esses resultados são comparados com dados da bibliografia que demonstram qual a retenção média dos telhados verdes, para verificarmos a validade da análise.



figura 77 - coletor transparente graduado
Fonte: A Autora (2014)



figura 78 - coletores de água da chuva instalados
Fonte: A Autora (2014)

A terceira etapa tem como objetivo analisar as temperaturas superficiais dos sistemas de cobertura e verificar o desempenho de cada uma das coberturas, comparando os sistemas de telhado verde entre eles, além dos sistemas de coberturas convencionais.

Os dados de temperatura superficiais foram coletados através de termopares do tipo K conectados a *dataloggers* do tipo TD 890 (figura 79 e figura 80). A temperatura do ar foi coletada nesse mesmo intervalo através de um termo-higrômetro *datalogger* - HT-4000 (figura 81).



figura 79 - *Datalogger* TD-90 com termopares do tipo K
Fonte: A autora (2014)



figura 80 - medição com *datalogger* TD-890 e termopares do tipo K
Fonte: A autora (2014)



figura 81 - HT-4000 - termo-higrômetro *datalogger*
Fonte: ICEL (2013)

Essa análise foi feita através das medidas de temperatura superficial superior, ou seja, sobre o substrato ou sobre as plantas, dependendo do tipo da mesma (figura 82) e temperatura superficial inferior (fixada na chapa de

compensado de base) com o termopar fixado com fita adesiva sobre o sensor de medição para evitar a influência dos ventos sobre o mesmo, conforme figura 83. O sensor de temperatura do ar foi fixado abaixo da estrutura em uma viga de madeira. A fixação dele nesse local foi com o objetivo de evitar que outras pessoas pudessem ver o sensor e ficasse suscetível ao roubo (figura 84).

Os termopares superiores e inferiores diferem em sua tipologia, sendo os superiores com haste, e os inferiores apenas o sensor fixado em fio com revestimento plástico.

Com o objetivo de protegê-los da chuva e do acesso por outras pessoas, os *dataloggers* foram colocados dentro de caixas de correio fixadas na estrutura do móvel (figura 85). Cada *datalogger* coletou os dados de dois módulos, sendo dois sensores para temperaturas superiores (entrada 01 e 02) e dois sensores para temperaturas inferiores (entrada 03 e 04).



figura 82 - sensor instalado para medição superficial superior
Fonte: A autora (2015)



figura 83 - sensor instalado para medição superficial inferior
Fonte: A autora (2014)



figura 84 - HT-4000 fixado na estrutura de madeira
Fonte: A Autora (2015)



figura 85 - caixa de correio para a locação dos dataloggers
Fonte: A Autora (2015)

As informações coletadas no *datalogger* foram baixadas em *software* específico do programa sendo essas informações repassadas para o computador e compilados em uma planilha (apêndice C). Cada medição foi realizada por um período mínimo 24 horas, com temperaturas coletadas em intervalos de 10 ou 15 minutos.

Foram realizadas medições de outubro de 2014 a abril de 2015, somando cinco eventos de medição.

Para análise dos dados foram elaborados gráficos de temperatura superficial superior e inferior, além de gráficos de diferença de temperatura (diferença entre a temperatura do ar e temperatura superficial), tabela com temperatura média, mínima, máxima e amplitude do ar de cada evento avaliado.

A quarta análise realizada refere-se à qualidade da água coletada por cada um dos sistemas. Para tal análise foi coletada um litro de cada amostra, após um evento de chuva, totalizando dois conjuntos de análise.

Essa etapa teve como objetivo analisar a qualidade da água da chuva escoada depois de passar em um sistema de telhado verde, cobertura cerâmica, cobertura de fibrocimento e laje impermeabilizada, analisando alguns aspectos para verificar a qualidade da água. Berndtsson (2010) destaca que a qualidade da água pode variar muito em função do solo, dos fertilizantes e das espécies vegetais.

Desta forma, para determinar a qualidade da água, foram analisadas as seguintes variáveis: pH, quantidade de sólidos, fósforo total, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal e coloração. Todos esses testes foram realizados no Labeam

(Laboratório de Engenharia Ambiental Francisco Borsari Neto) do DHS (Departamento de Hidráulica e Saneamento) da UFPR (Universidade Federal do Paraná).

A primeira análise realizada foi a do pH da água, que deve ser feita assim que coletada a água da chuva através de uma análise direta de potencionometria no pHmetro de bancada (figura 86). Separa-se uma amostra da água e posiciona-se o sensor dentro da água e aguarda-se até o valor estabilizar (figura 87).

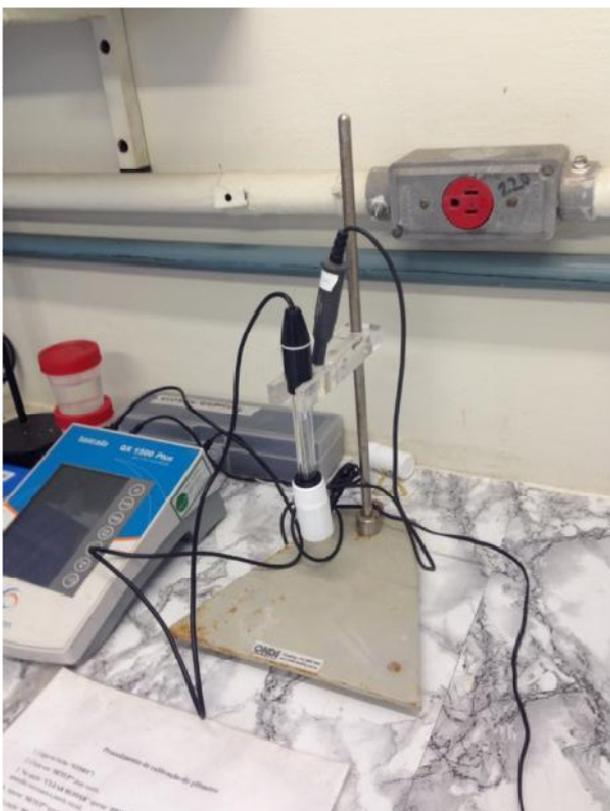


figura 86 - pHmetro de bancada
Fonte: A autora (2014)

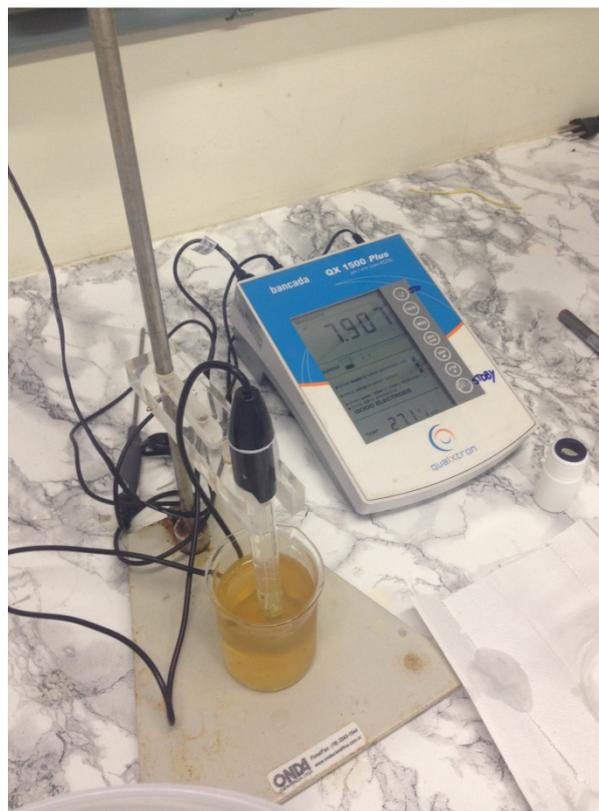


figura 87 - medição de pH através do pHmetro de bancada
Fonte: A autora (2014)

A análise da quantidade de sólidos presentes na água foi feita pelo método gravimétrico, que corresponde à análise de diferença de peso em relação ao volume de amostra utilizada no ensaio. Para realização desse ensaio, pesa-se a membrana de AC 0,47mm 0,45 μ (figura 88) antes da filtragem em uma balança de precisão, filtra-se a amostra (figura 89) através de uma bomba de vácuo e posteriormente a membrana de filtragem é seca em estufa (figura 91) e pesada novamente, a diferença de peso corresponde à quantidade de sólidos presente na água. No anexo A, caderno de procedimentos do Labeam, consta todo o detalhamento do procedimento a ser realizado nessa etapa.



figura 88 - Membrana para filtragem da água
Fonte: A autora (2015)



figura 89 - Sistema de filtragem da água a vácuo
Fonte: A Autora (2015)

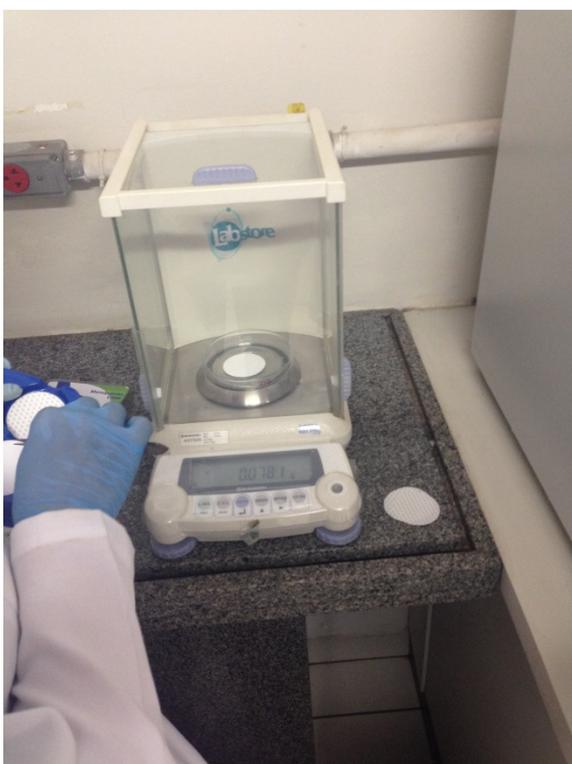


figura 90 - Membrana para filtragem da água
Fonte: A autora (2015)



figura 91 - Estufa para secagem das membranas
Fonte: A autora (2015)

Quanto à análise do fósforo, foi utilizado o método do ácido ascórbico que, conforme método adotado no Labeam, se dá através da reação entre "molibdato de amônio e antimônio tartarato de potássio em meio ácido (H_2SO_4) com ortofosfato, formam o ácido fosfomolibdico que, em presença de ácido ascórbico, é reduzido para fosfomolibdato, composto de coloração azul intensa característica". Conforme descrito no anexo A (caderno de procedimentos do Labeam), o equipamento utilizado para a leitura dos dados é o espectrofotômetro UV-Vis (figura 92). Para comparar a coloração é realizada junto a curva de calibração que tem a função de calibrar o método para a leitura das amostras através do método de colometria, conforme figura 93.



figura 92 - Espectrofotômetro UV-Vis
Fonte: A autora (2014)



figura 93 - Curva de calibração Fósforo
Fonte: A autora (2014)

O nitrogênio amoniacal, parâmetro previsto na legislação referente a qualidade de água (Resolução 357/05), deve ser medido até 48 horas após a precipitação. Desta forma, na primeira análise não foi possível realizá-lo no período indicado, sendo realizada a análise do nitrogênio total. Na segunda análise foi possível fazer a análise do nitrogênio amoniacal dentro do período previsto no método.

Segundo o método utilizado no Labeam, "A presença de um composto de intensa coloração azul-esverdeado característica, azul de indofenol, é formada através da reação entre a concentração de $N-NH_3$ presente na amostra, hipoclorito

de sódio e fenol em meio básico, tendo o nitroprussiato de sódio como catalisador da reação". A leitura também é feita através do espectrofotômetro, assim como é feita a curva de calibração (figura 94) para comparação com as amostras, conforme método previsto no caderno de procedimentos no anexo A.



figura 94 - Curva de calibração do nitrogênio amoniacal
Fonte: A autora (2014)

Para verificação do nitrogênio total o método aplicado foi digestão por persulfato de potássio, conforme método aplicado no Labeam "Quantificação de nitrogênio total através de uma oxidação alcalina em autoclave (25min / 14kg.cm-1) na faixa de temperatura entre 110 - 125°C, para conversão de todas as formas de nitrogênio presentes a N-NO₃⁻ e posterior redução pela coluna de Cd-Cu para detecção na forma de N-NO₂" (Anexo A). Através da adição da solução reativa, as amostras, com presença de nitrogênio, tomam uma cor rosada. A leitura da amostra é feita através do espectrofotômetro UV-Vis (figura 92). Para comparar a coloração é realizada junto à curva de calibração, que tem a função de calibrar o método para a leitura das amostras através da colonometria. A quantificação da concentração de Nitrogênio total (mg.L-1 ou µg.L-1) é feita através da equação da reta, obtida na curva de calibração para N-NO₃⁻ (ver anexo A).



figura 95 - Redução pela coluna Cd-Cu
Fonte: A autora (2014)

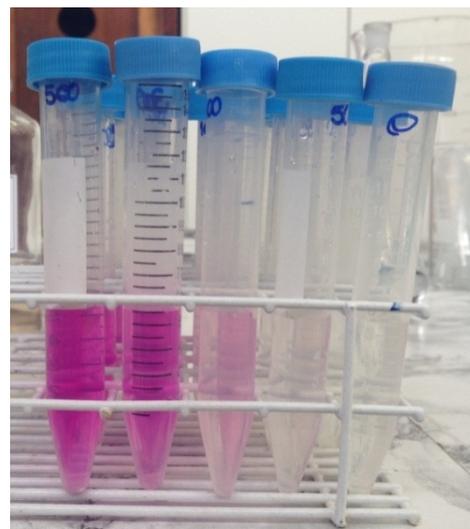


figura 96 - Amostras para curva de calibração
(500 ao 0)
Fonte: A autora (2014)

Quanto à coloração da água, será feita uma análise visual comparativa entre a amostra e a água destilada, que não possui nenhuma coloração, no equipamento NQ 200 (figura 97). Nesse modelo, coloca-se uma amostra branca (água destilada) e no tubo do lado água da amostra (figura 98); através de um filtro de cor compara-se a amostra com a coloração branca até chegarem ao mesmo tom, sendo então feita a leitura. Para as coletas com coloração intensa é necessário fazer a diluição da água para então realizar a leitura, e depois por cálculo chegar ao valor que corresponde à cor (ver apêndice G).



figura 97 - Leitura de cor NQ200
Fonte: A autora (2014)

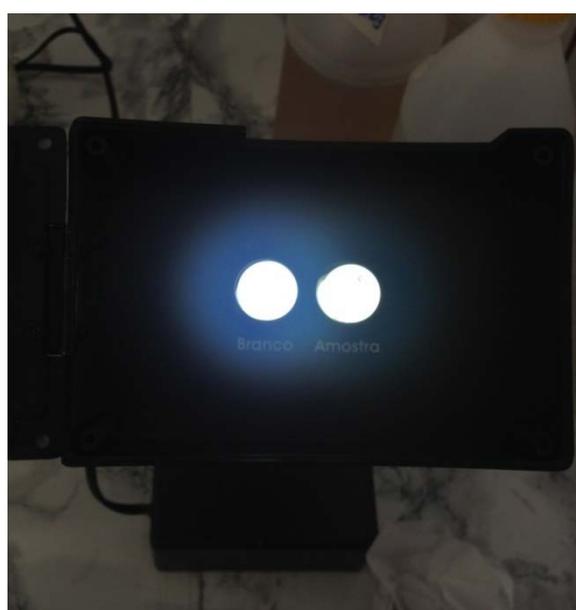


figura 98 - Ao lado esquerdo o branco (água destilada) lado direito a amostra.
Fonte: A autora (2014)

Os resultados obtidos serão comparados com os telhados convencionais, para verificar a variação e a possibilidade de uso dessas águas para fins não potáveis e comparar com a legislação vigente, com o objetivo de verificar o nível de qualidade apresentando.

No Brasil e em Curitiba não existe uma legislação específica quanto à qualidade de água da chuva para fins não potáveis. Desta forma, a comparação será feita com as legislações que tratam sobre qualidade de corpos de água, água potável e balneabilidade através da Resolução do Conama n.º 357/2005 (BRASIL, 2005) e n.º 274/2000 (BRASIL, 2000) e Portaria MS n.º 518/2004 (BRASIL, 2004).

A Resolução do Conama n.º. 357/2005 "Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências." Essa resolução definiu padrões de qualidade da água para diferentes usos.

Na tabela 5 destaca-se a classificação das águas, quanto aos fins não potáveis, segundo essa resolução.

tabela 5 - Classificação do uso de águas segundo Resolução Conama 357/2005 (BRASIL, 2005)

| Classificação | Uso da água |
|----------------------|---|
| Classe I | à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película. |
| Classe II | irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto |
| Classe III | à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras |
| Classe IV | à harmonia paisagística |

Fonte: A Autora, a partir de dados de Brasil, 2005 (2015)

A legislação aborda corpos de água e não especificamente água de chuva. Entretanto, como não existe uma legislação específica quanto as águas da chuva, utilizaremos tal legislação com padrão comparativo.

Outra resolução que podemos destacar é a Resolução Conama 274/2000 (BRASIL, 2000) que determina os padrões de qualidade de água para balneabilidade, tanto para águas doces e salobras.

Além dessas resoluções a Portaria MS 518/2004 (BRASIL, 2004) traz os padrões de qualidade da água potável, também destacados na análise. Os padrões analisados e destacados pela legislação estão descritos na tabela 6. Vale destacar que as legislações trazem outros parâmetros, entretanto não são objetos de análise na presente pesquisa.

tabela 6 - Parâmetros adotados pela legislação quanto a qualidade da água

| | Parâmetro | pH | Sólidos Totais mg/l | Coloração UC ou UH | Nitrogênio Total mg/l | Nitrogênio Amoniacal mg/l | Fósforo Total mg/l |
|------------|-----------------------------|---------|------------------------|-----------------------|--------------------------|--|-----------------------|
| Legislação | Resolução Conama 274/2000 | 6-9,5 | * | * | * | * | * |
| | Portaria N º518/04 MS | 6-9,5 | 1.000 | 15 | * | * | * |
| | Resolução 357/05 -Classe 01 | 6,0-9,0 | 500 | Cor natural | 1,27 | 3,7mg/L N, para pH ≤ 7,5 2,0 mg/L N, para 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0 mg/L N, para 8,0 < pH ≤ 8,5 | 0,02 |
| | Resolução 357/05 -Classe 02 | 6,0-9,0 | | 75 | | | 0,05 |
| | Resolução 357/05 -Classe 03 | 6,0-9,0 | 500 | 75 | * | 13,3 mg/L N, para pH ≤ 7,5 5,6 mg/L N, para 7,5 < pH ≤ 8,0 2,2 mg/L N, para 8,0 < pH ≤ 8,5 | 0,075 |

* Não consta na legislação

Fonte: A autora, a partir dos dados das legislações: Brasil (2000), Brasil (2004), Brasil (2005)

4 RESULTADOS

4.1 DESENVOLVIMENTO DAS ESPÉCIES

Foi realizado o acompanhamento do crescimento das espécies vegetais para verificar seu desenvolvimento e adaptação às condições climáticas de Curitiba. A análise foi realizada durante um ano, de fevereiro de 2014 a fevereiro de 2015.

Para facilitar a comparação foi feito um levantamento fotográfico das espécies ao longo desse período com fotos mensais ou quinzenais, conforme figura 100 (período de 10/02/2014 a 15/10/2014) e figura 101 (período de 25/07/2014 a 26/02/2015).

Na figura 100 pode-se analisar o desenvolvimento das plantas nos meses de fevereiro a julho de 2014. Já no primeiro mês todas as plantas apresentaram certo grau de crescimento. As espécies *Tradescantia zebrina* e *Callisia repens*, apresentaram o maior desenvolvimento quanto ao fechamento do solo, podendo ser associado à sua característica alastrante. Em abril, todas as espécies já apresentavam fechamento quase completo do solo. A espécie *Sedum mexicanum* apresentou o crescimento mais lento dentre as espécies analisadas, característica da espécie, apresentando fechamento completo do solo apenas no mês de junho de 2014. As plantas se desenvolveram de forma exponencial até meados de maio, a espécie *Bulbine frutescens* apresentou ainda floração nesse período.

As fotos tiradas no dia 26/05/2014 apresentam uma alteração nas vegetações, decorrência da geada moderada que aconteceu na madrugada do dia 20/05/2014. A espécie *Arachis Repens* sofreu o maior impacto, suas folhas "queimaram" devido a geada (figura 100). A geada é um processo de deposição de cristais de gelo, sendo registrado geralmente quando a temperatura do solo fica abaixo de 0°C e a temperatura do ar pouco acima disso (3°C ou 4°C). O que ocorre com as plantas é que seus órgãos podem não suportar as baixas temperaturas e morrer, e isso pode ser perceptível nas plantas pela coloração negra de suas partes aéreas, conforme figura 100 na data de 11/06/2014.

Quanto a *Bulbine frutescens*, observou-se que suas flores morreram, mas suas folhas tiveram pouca alteração, assim como o *Sedum mexicanum* que sofreu apenas uma leve alteração na sua cor. Quanto a *Tradescantia zebrina* e *Callisia*

repens, muitas das suas folhas morreram, mas de forma menos intensa que na espécie *Arachis repens*, que pode ser percebida através da coloração escura da maior parte das folhas e conseguiram rebrotar.

No dia 26/05/2014 foram adubados todos os módulos com esterco de galinha, com 500 gramas aproximadamente de adubo por módulo e então realizada a rega. A opção pelo adubo orgânico se deu pois ele é rico em nitrogênio, que auxilia no desenvolvimento das plantas e esse tipo de adubo é liberado mais lentamente; desta forma a sua ação é mais prolongada, o que é desejado no telhados verdes, tendo em vista que a intenção não era realizar novas adubações durante o período de testes.

Com a queima das folhas, a *Arachis repens* não conseguiu rebrotar a ponto de cobrir novamente o solo, dando espaço para muitas ervas daninhas, como pode ser visto nas fotos do dia 23/06 e 15/07 (figura 100). Como Curitiba possui um inverno intenso e a geada é comum nessa época, optou-se por substituir essa espécie vegetal, destacando que ela não é indicada para telhados verdes na cidade de Curitiba, devido as condições de inverno.

No dia 25/07/2014 (figura 101) foi feita a troca da espécie vegetal, substituindo-a por uma gramínea, tendo em vista que esse tipo de vegetação é muito utilizada em telhados verdes, principalmente aqueles que possuem a função de terraço, ou seja, possuem circulação de pessoas.

As gramas são facilmente encontradas e comumente utilizadas no paisagismo no Brasil. A espécie escolhida foi a *Zoysia tenuifolia*, conhecida como grama coreana ou grama japonesa. Segundo Lorenzi (2013), é uma herbácea rizomatosa estolonífera, nativa do Japão e Coreia, uma gramínea de pleno sol que possui crescimento lento, reduzindo assim a manutenção. A escolha por essa espécie diante das outras gramíneas se deu pelo seu lento crescimento e baixa manutenção.

Observou-se a remoção de uma muda da espécie *Bulbine frutescens* e da *Sedum mexicanum*, tendo sido retirado alguns brotos do mesmo módulo para realizar o fechamento das mesmas.

A *Bulbine frutescens* manteve o seu porte ao longo de todo o ano, alterando a sua coloração para tons mais amarelos ou esverdeados conforme o período do ano. Acredita-se que a adubação, a insolação e a precipitação sejam os principais fatores que influenciam nessa variação da espécie.

A *Tradescantia zebrina*, por sua característica alastrante, apresentou um rápido e satisfatório fechamento do solo, criando um maciço que se manteve ao longo do ano, sofrendo apenas no período de geada, entretanto rebrotando sem a necessidade de substituição da espécie.

A *Zoysia tenuifolia* tem como característica o alto consumo de água e sugere-se que seja feita a irrigação nos primeiros 3 ou 4 meses do plantio para sua manutenção e enraizamento (PATRO, 2013), entretanto, o objetivo desta pesquisa, era observar o desenvolvimento das espécies sem irrigação, não sendo realizada nenhum tipo de irrigação artificial.

O mês de outubro de 2014, conforme figura 99, teve 16 dias de estiagem. Assim, as folhas da grama queimaram apresentando coloração dourada após esse período. Conforme figura 101, após alguns eventos de chuva foi possível observar o rebrotamento da grama, apresentando, em dezembro, o fechamento completo do solo.

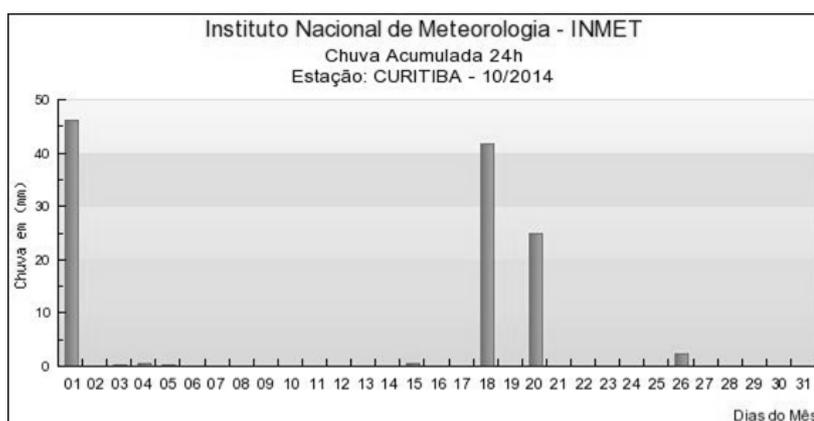


figura 99 - Gráfico pluviométrico mês de outubro de 2014
Fonte: Inmet (2015)

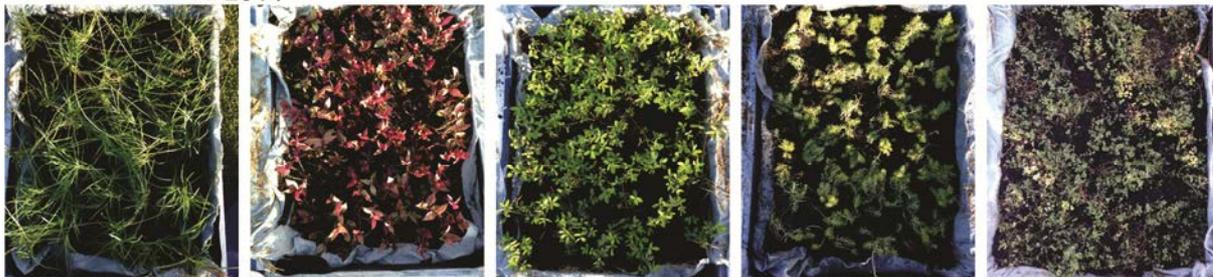
A espécie *sedum mexicanum* adaptou-se melhor ao clima de inverno, apresentando um fechamento mais completo do solo nesse período. Nos meses com temperatura mais elevada (novembro de 2014 a fevereiro de 2015) o fechamento do solo foi insatisfatório, dando espaço ao crescimento de ervas daninhas (figura 101).

A espécie *Callisia repens* apresentou um fechamento do substrato já no primeiro mês e manteve-se constante ao longo do ano. Em períodos com insolação mais alta as folhas se caracterizavam pela coloração mais arroxada e menor, em períodos de menor insolação as folhas ficaram maiores e mais esverdeadas.

Essas espécies foram mantidas até o final dos experimentos.

Bulbine frutescens *Tradescantia zebrina* *Arachis repens* *Sedum mexicanum* *Callisia repens*

10 de fevereiro de 2014



07 de março de 2014



17 de abril de 2014



26 de maio de 2014



11 de junho de 2014



15 de julho de 2014



figura 100 - Desenvolvimento das vegetações entre os meses de fevereiro e julho de 2014
 Fonte: A Autora (2015)

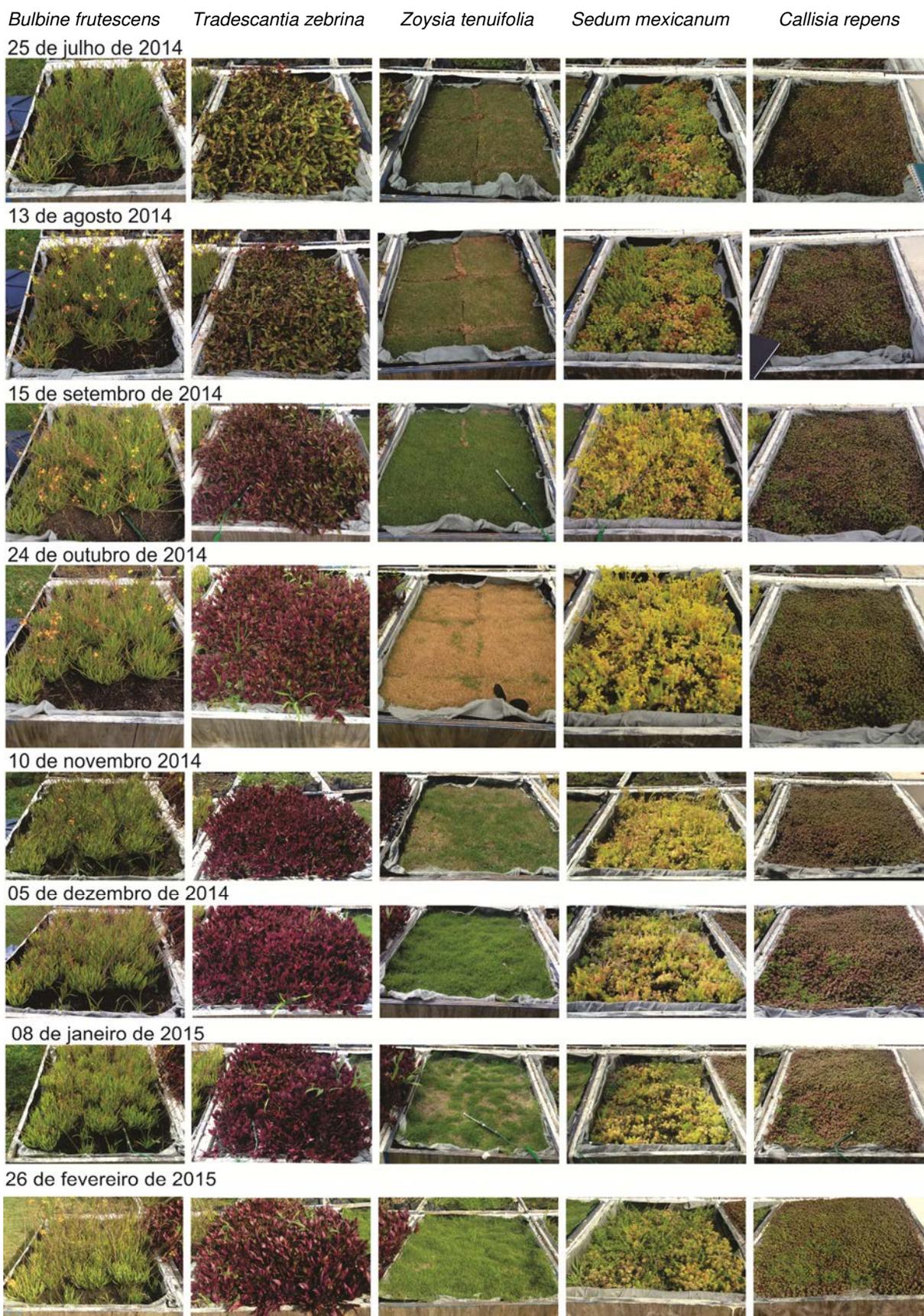


figura 101 - Desenvolvimento das vegetações entre os meses de julho de 2014 a fevereiro de 2015.

Fonte: A Autora (2015)

4.1 RETENÇÃO DE ÁGUA DA CHUVA

Quanto à retenção de água da chuva, foram analisados os dados de junho de 2014 a janeiro de 2015. Pode-se perceber que alguns meses apresentaram uma variação significativa com a média normal de chuva, segundo o Inmet (2015). Destaca-se o mês de Julho, que alcançou um índice pluviométrico em torno de 50% menor que a média. Já os meses de junho, setembro e novembro de 2014 tiveram índices bem superiores aos observados na média, chegando a 82% mais alto no mês de junho e 60% no mês de novembro.

tabela 7 - Precipitação 2014/2015 e Precipitação média de 1961 a 1990

| | Jun/14 | Jul/14 | Ago/14 | Set/14 | Out/14 | Nov/14 | Dez/14 | Jan/15 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Precipitação 2014 e 2015 (mm) | 210,4 | 49 | 62,7 | 176,4 | 116,8 | 203,2 | 155,6 | 180,5 |
| Precipitação média 1961 a 1990 (mm) | 115,6 | 98,8 | 73,4 | 119,2 | 133,3 | 126,9 | 152,3 | 171,8 |

Fonte: A autora, a partir de dados Inmet (2015)

Na tabela 8 destacam-se treze eventos de chuva registrados durante esse período. Alguns outros levantamentos foram feitos entretanto, devido ao transbordo de todos os módulos, não foram considerados para análise.

Os galões utilizados para coleta retêm até 20 litros de água, em uma metragem de 0,75 m² (1m x 0,75m), ou seja, 26,7 mm de água. Para comparação dos dados foram utilizados ainda os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet).

tabela 8 - tabela de retenção de água da chuva nos meses de junho de 2014 a janeiro de 2015

| Evento | Data | Unidade | Bulbine | Trapoeraba | Grama Amendoim | Sedum | Dinheiro em penca | Laje | Fibrocimento | Cerâmica | INMET |
|--------|------------|---------|---------|------------|----------------|-------|-------------------|-------|--------------|----------|-------|
| 1 | 18/06/2014 | mm | 1,33 | 4,67 | 3,33 | 2,67 | 6,67 | 16,67 | * | * | 20,1 |
| 2 | 30/06/2014 | mm | 1,33 | 8,00 | 6,67 | 4,67 | 12,00 | 24,67 | * | * | 21,1 |
| 3 | 15/07/2014 | mm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,33 | * | * | 2,7 |
| 4 | 23/07/2014 | mm | 1,33 | 4,00 | 1,33 | 1,33 | 8,00 | 26,67 | * | * | 18,5 |
| Evento | Data | Unidade | Bulbine | Trapoeraba | Grama Coreana | Sedum | Dinheiro em penca | Laje | Fibrocimento | Cerâmica | INMET |
| 5 | 13/08/2014 | mm | 3,33 | 8,00 | 9,33 | 3,33 | 8,67 | ** | * | * | 19,5 |
| 6 | 19/08/2014 | mm | 15,33 | 19,33 | 19,33 | 17,33 | 20,00 | ** | * | * | 25,3 |
| 7 | 19/09/2014 | mm | 20,00 | 25,33 | 22,00 | 20,00 | 24,00 | ** | * | * | 34,7 |
| 8 | 18/10/2014 | mm | 12,67 | 20,00 | 17,33 | 14,67 | 14,67 | ** | * | * | 47,5 |
| 9 | 24/10/2014 | mm | 6,67 | 8,67 | 6,67 | 9,33 | 9,33 | 18,67 | * | * | 25,0 |
| 10 | 18/12/2014 | mm | 0,67 | 1,33 | 1,33 | 1,33 | 1,33 | 14,00 | * | * | 8,00 |
| 11 | 08/01/2015 | mm | 9,33 | 12,00 | 10,67 | 13,33 | 12,00 | 18,67 | 17,33 | 16,00 | 40,2 |
| 12 | 09/01/2015 | mm | 6,67 | 6,67 | 8,00 | 5,34 | 5,33 | 2,00 | 2,67 | 2,67 | 4,5 |
| 13 | 30/01/2015 | mm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,33 | 6,67 | 8,00 | 16,2 |

*Sem medição nesses módulos - instalação posterior

**Transbordo dos galões de captação de água da chuva

Fonte: A autora (2015)

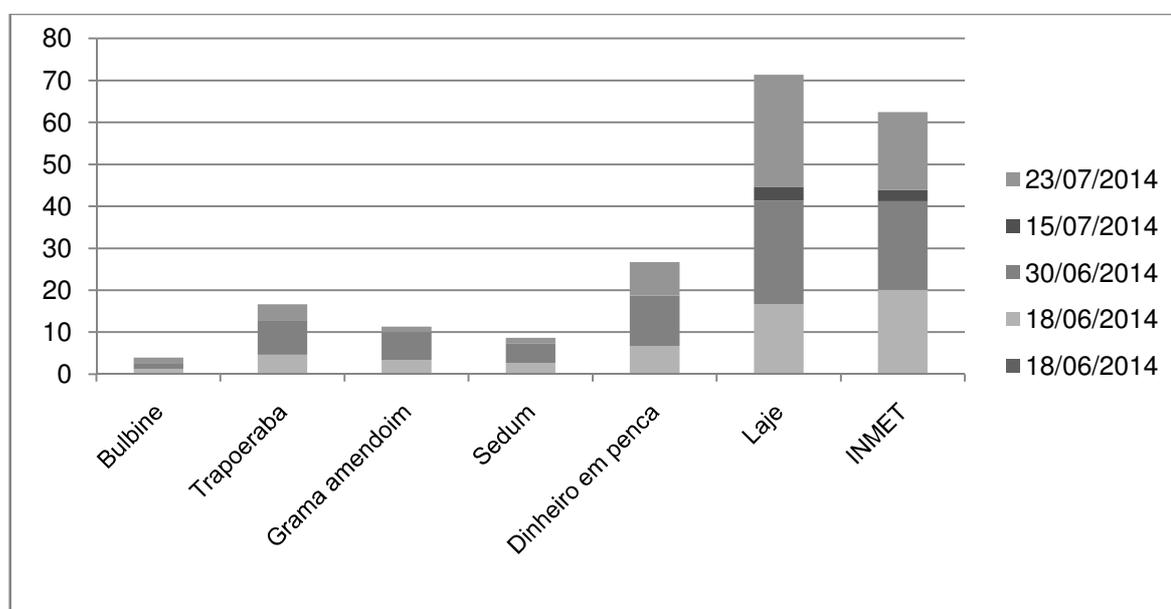
Os 4 primeiros eventos de chuva foram registrados no módulo de número 3, composto da espécie grama amendoim (*Arachis Repens*); nos eventos posteriores a análise foi feita com a grama coreana (*Zoysia tenuifolia*).

A análise foi separada em três tabelas distintas: na tabela 9 destacam-se os 4 primeiros eventos (com a espécie grama amendoim); na tabela 10 apresenta-se a retenção de água de chuva nos oito distintos módulos (5 de telhados verdes, 3 telhados convencionais); eventos 11, 12 e 13 e por fim, na tabela 11, uma análise comparativa entre os sistemas de telhado verde e os índices do Inmet (eventos 05 ao 12).

tabela 9 - retenção da água da chuva - eventos 1 ao 4

| Evento | Data | Un. | Bulbine | Trapoeraba | Grama amendoim | Sedum | Dinheiro em penca | Laje | INMET |
|--|------------|-----|----------|------------|----------------|------------|-------------------|------------|-----------|
| 1 | 18/06/2014 | mm | 1,33 | 4,67 | 3,33 | 2,67 | 6,67 | 16,67 | 20,1 |
| 2 | 30/06/2014 | mm | 1,33 | 8,00 | 6,67 | 4,67 | 12,00 | 24,67 | 21,1 |
| 3 | 15/07/2014 | mm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,33 | 2,7 |
| 4 | 23/07/2014 | mm | 1,33 | 4,00 | 1,33 | 1,33 | 8,00 | 26,67 | 18,5 |
| TOTAL | | | 4 | 16,67 | 11,33 | 8,67 | 26,67 | 71,33 | 62,4 |
| PORCENTAGEM DE RETENÇÃO DE ÁGUA | | | % | 94% | 77% | 84% | 88% | 63% | 0% |

Fonte: A autora (2015)

figura 102 - Escoamento de água de chuva em milímetros - eventos 1 ao 4
Fonte: A Autora (2015)

Os eventos apresentados na tabela 9 demonstram que a espécie *Bulbine frutescens* apresentou a maior retenção de água da chuva (94%), seguida da espécie *Sedum mexicanum* (88%). As espécies *Tradescantia zebrina* e *Arachis repens* retiverem 77% e 88%, respectivamente e *Callisia repens* reteve 63% da água da chuva. A laje impermeabilizada foi utilizada com pluviômetro, ou seja, foi considerado que ela escoou 100% da água da chuva.

No evento 03 podemos perceber que, com níveis baixos de precipitação, os telhados verdes podem reter até 100% da água escoada, independente da espécie analisada.

Na figura 102 pode-se visualizar que as espécies do tipo suculenta, ou seja, a bulbine e sedum, obtiveram o melhor desempenho quanto à retenção de água da chuva.

tabela 10 - tabela de retenção de água da chuva no mês de janeiro de 2015

| Evento | Data | Unidade | Bulbine | Trapoeraba | Grama Coreana | Sedum | Dinheiro em penca | Laje | Fibrocimento | Cerâmica | INMET |
|--|------------|---------|---------|------------|---------------|-------|-------------------|-------|--------------|----------|-------|
| 11 | 08/01/2015 | mm | 9,33 | 12,00 | 10,67 | 13,33 | 12,00 | 18,67 | 17,33 | 16,00 | 40,2 |
| 12 | 09/01/2015 | mm | 6,67 | 6,67 | 8,00 | 5,34 | 5,33 | 2,00 | 2,67 | 2,67 | 4,5 |
| TOTAL | | mm | 16,00 | 18,67 | 18,67 | 18,67 | 17,33 | 20,67 | 20,00 | 18,67 | 44,7 |
| PORCENTAGEM DE ESCOAMENTO DE ÁGUA | | % | 23% | 10% | 10% | 10% | 16% | 0% | 3% | 10% | |
| 13 | 30/01/2015 | mm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,33 | 6,67 | 8,00 | 16,2 |
| TOTAL | | mm | 16,00 | 18,67 | 18,67 | 18,67 | 17,33 | 32,00 | 26,67 | 26,67 | |
| PORCENTAGEM DE RETENÇÃO DE ÁGUA | | % | 50% | 42% | 42% | 42% | 46% | 0% | 17% | 17% | |

Fonte: A autora (2015)

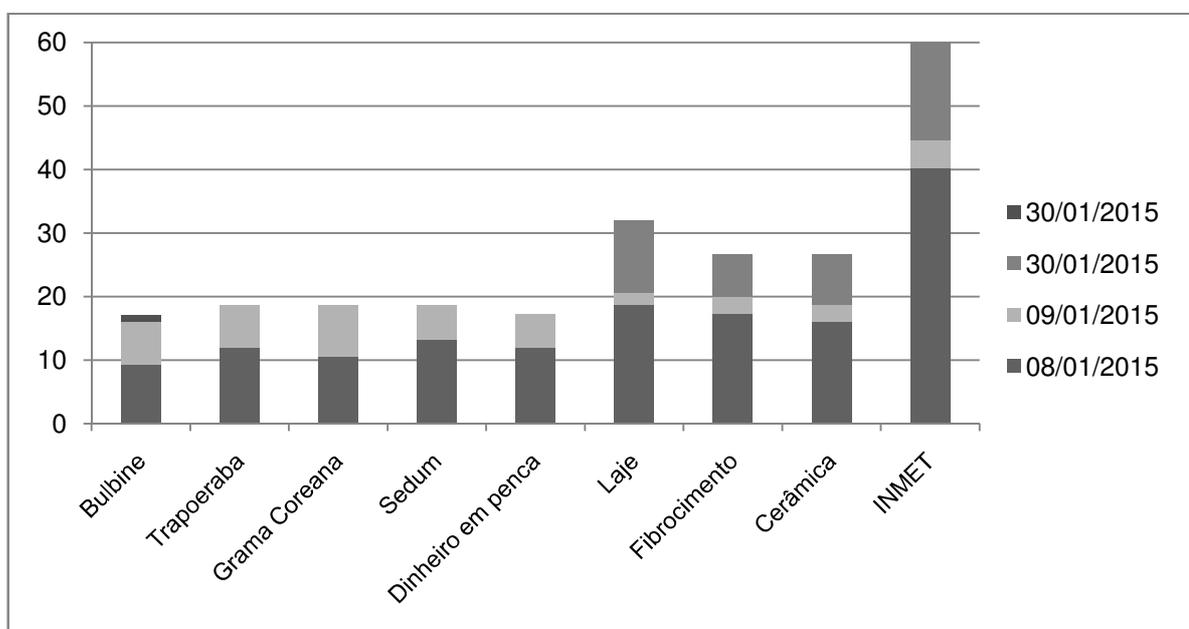


figura 103 - Escoamento de água de chuva em milímetros - eventos 11 ao 13

Fonte: A Autora (2015)

Na tabela 10 destacamos os eventos de chuva no mês de janeiro de 2015. Nesses eventos, além da análise da retenção dos telhados verdes, analisou-se a retenção de água nas telhas de fibrocimento e cerâmica. A retenção desses dois tipos de telhado foram de 13 e 16% respectivamente, quando comparada com a laje impermeabilizada. As retenções das espécies vegetais demonstraram novamente que a espécie bulbine tem a maior retenção entre as espécies analisadas, retendo 50%, as espécies grama e dinheiro em penca apresentaram retenção de 42%, a trapoeraba 39% e o sedum 27%.

No evento cuja leitura foi feita no dia 30/01, pode-se perceber que não foi relatada vazão nos módulos de telhado verde, ou seja, toda a água foi armazenada no sistema para abastecer as vegetações, Isso ocorre em decorrência da saturação do solo. Na data em questão, a temperatura e incidência solar foram intensas e, segundo o Inmet (2015), não foi relatada chuva intensa nos 7 dias que antecederam a coleta.

Observando os eventos do dia 08 e 09 de janeiro de 2015 pode-se perceber que a precipitação no dia 09 foi muito baixa, entretanto o escoamento nos módulos foi maior que a retenção. Isso é consequência da característica de retardo na vazão que os sistemas de telhado verde proporcionam, já que a coleta foi feita em um dia de chuva (08/01). Mesmo com essa saturação do sistema, no conjunto a bulbine reteve 23% da água da chuva, o dinheiro em penca 16% e as demais espécies 10%. Na análise do conjunto desses três eventos de chuva, os telhados retiveram em média 45% da água da chuva, sendo que a bulbine apresentou a maior retenção.

Na figura 103 pode-se perceber que o registro do Inmet apresentou um volume maior que da laje utilizada como pluviômetro nesse experimento; desse modo, foram considerados, para efeito de porcentagem, os dados registrados na laje.

tabela 11 - tabela de retenção de água da chuva meses de junho e julho

| Evento | Data | Un. | Bulbine | Trapoeraba | Grama Coreana | Sedum | Dinheiro em penca | INMET |
|--|------------|-----|--------------|---------------|---------------|--------------|-------------------|---------------|
| 5 | 13/08/2014 | mm | 3,33 | 8,00 | 9,33 | 3,33 | 8,67 | 19,5 |
| 6 | 19/08/2014 | mm | 15,33 | 19,33 | 19,33 | 17,33 | 20,00 | 25,3 |
| 7 | 19/09/2014 | mm | 20,00 | 25,33 | 22,00 | 20,00 | 24,00 | 34,7 |
| 8 | 18/10/2014 | mm | 12,67 | 20,00 | 17,33 | 14,67 | 14,67 | 47,5 |
| 9 | 24/10/2014 | mm | 6,67 | 8,67 | 6,67 | 9,33 | 9,33 | 25,0 |
| 10 | 18/12/2014 | mm | 0,67 | 1,33 | 1,33 | 1,33 | 1,33 | 8,00 |
| 11 | 08/01/2015 | mm | 9,33 | 12,00 | 10,67 | 13,33 | 12,00 | 40,2 |
| 12 | 09/01/2015 | mm | 16,00 | 18,67 | 18,67 | 18,67 | 17,33 | 4,5 |
| TOTAL | | mm | 84,00 | 113,33 | 105,33 | 98,00 | 107,33 | 204,70 |
| PORCENTAGEM DE RETENÇÃO DE ÁGUA | | % | 59% | 45% | 49% | 52% | 48% | 0% |

Fonte: A autora (2015)

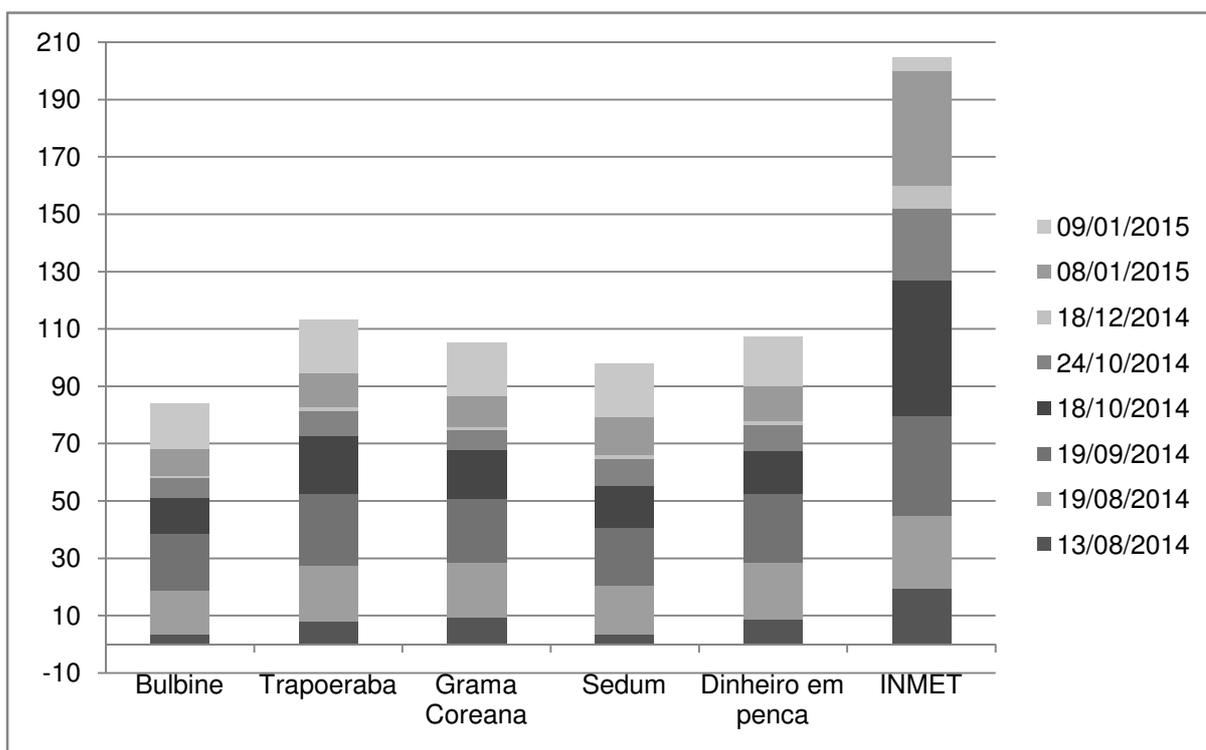


figura 104 - Escoamento de água de chuva em milímetros - eventos 5 ao 12

Fonte: A Autora (2015)

Na tabela 11 foi realizado um comparativo apenas da retenção das espécies de telhado verde ao longo de oito eventos, do mês de agosto de 2014 até o mês de janeiro de 2015. Nessa tabela, a espécie que apresentou a maior retenção foi novamente a bulbine, com 59% de retenção; em segundo lugar ficou o sedum, com 52%; em terceiro e quarto a grama coreana e o dinheiro em penca, com 49% e 48%; e, por fim, a trapoeraba roxa, com 45% da água retida.

Pode-se perceber, na figura 104, que a variação entre as espécies vegetais é significativa quando comparadas entre si; entretanto, quando comparada com o índice pluviométrico, essa variação é de 1 a 15% entre as espécies.

Comparando os resultados obtidos com os resultados apresentados por Baldessar (2012), os telhados verdes apresentaram uma retenção significativa da água da chuva. Em seu estudo, Baldessar verificou que o telhado verde reteve 69,3%, e a telha cerâmica 22,7%. A telha cerâmica no atual estudo apresentou uma retenção inferior de 16%. Baldessar (2012), em seu estudo, destaca que o alto índice de retenção por ela alcançada quanto a telha cerâmica é consequência da baixa inclinação do sistema, inferior a inclinação mínima descrita na norma.

Os telhados verdes variaram de 100% de retenção a 9,5% dependendo do índice pluviométrico e do período de estiagem que antecedeu o período de chuva (ver apêndice B). Como resultado, retiveram em média 61,6% da água da chuva, resultado similar ao apresentado por Kosareo e Rios (2007) que afirmam que a retenção média de um telhado verde do tipo extensivo é de 60%.

Como resultado geral podemos destacar que os telhados com plantas do tipo suculenta (*Bulbine frutescens* e *Sedum mexicanum*) apresentaram a maior retenção, seguida das espécies: *Zoysia tenuifolia*, *Callisia repens* e *Tradescantia zebrina*.

4.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉRMICO

Na presente pesquisa busca-se verificar qual o desempenho térmico dos telhados verdes para a cidade de Curitiba e qual a influência que a espécie vegetal pode ter nesse desempenho.

A análise de temperatura superficial foi realizada nos 8 distintos módulos separados em cinco eventos de outubro de 2014 a abril de 2015, com duração

média de 48 horas de registro. Na tabela 12 podemos perceber as condições climáticas para cada dia de análise.

tabela 12 - Condições climáticas, conforme dados INMET

| | Data | Precipitação (mm) | Temp. Máxima (°C) | Temp. Mínima (°C) | Insolação (horas) | Umid. Rel. Média (%) |
|-----------|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
| Evento 01 | 07/10/2014 | 0 | 24,7 | 11,4 | 4,6 | 79 |
| | 08/10/2014 | 0 | 25,9 | 14,6 | 5,4 | 78 |
| | 09/10/2014 | 0 | 28,3 | 13,4 | 10,2 | 67 |
| Evento 02 | 07/11/2014 | 10,6 | 20,4 | 16,2 | 0 | 91 |
| | 08/11/2014 | 10,4 | 26,8 | 16,2 | 3,5 | 84 |
| | 09/11/2014 | 9,4 | 27,4 | 14,6 | 11,1 | 71 |
| | 10/11/2014 | 0 | 27,4 | 13,7 | 10,2 | 70 |
| Evento 03 | 07/01/2015 | 40,1 | 28,2 | 19,1 | 6,3 | 78 |
| | 08/01/2015 | 0,3 | 30 | 19,7 | 1,6 | 70 |
| | 09/01/2015 | 4,4 | 31,2 | 18,6 | 11,1 | 69 |
| Evento 04 | 28/01/2015 | 12,2 | 27,3 | 19,6 | 4,7 | 77 |
| | 29/01/2015 | 4 | 27,1 | 19,3 | 6,7 | 75 |
| | 30/01/2015 | 9,8 | 22,1 | 16,3 | 0 | 88 |
| Evento 05 | 09/04/2015 | 0 | 25,0 | 13,3 | 8,2 | 77 |
| | 10/04/2015 | 0 | 25,0 | 15,4 | 5,6 | 80 |

Fonte: A autora, a partir de dados do Inmet (2015)

Para análise de temperatura superficial, conforme descrito no método, utilizou-se termopares do tipo K. Os mesmos foram posicionados sobre os módulos, para coleta das temperaturas superiores (figura 105), e abaixo dos módulos, fixados com fita adesiva junto a base, para registrar as temperaturas inferiores (figura 106). A temperatura do ar foi registrada através de um sensor fixado na parte inferior da estrutura (figura 107), ficando protegido da incidência solar direta. Ressalta-se que no ensaio em abril de 2015 foi deixado o *datalogger* exposto ao sol, sobre a cama teste, para verificar a variação de temperatura com os outros registros.

Os dados de temperatura foram ainda comparados com os dados do Inmet (2015). Esses dados são coletados no campus do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná pelo Simepar (Sistema Meteorológico do Paraná), localizado a 2 km lineares de distância do local do experimento.



figura 105 - Sensor tipo K temperatura superficial superior.

Fonte: A autora (2015)



figura 106 - Sensor tipo K temperatura superficial inferior.

Fonte: A autora (2015)



figura 107 - Datalogger HT - 4000 - temperatura e umidade do ar.

Fonte: A autora (2015)

4.2.1 Evento 01: 07 a 09 de outubro de 2014

A primeira análise foi realizada durante um período de 40 horas, do dia 07 ao dia 09 de outubro de 2014. Entretanto, o sensor 02 do *datalogger* de número 02 ficou desconectado do dia 07/10/2014 às 15:53h até o dia 08/10/2014 às 8:38h, não registrando as temperaturas superiores do módulo 04 (*Sedum mexicanum*).

O recorte utilizado na análise a seguir destaca os dados registrados do dia 08/10/2014 às 8:53h até 09/10/2014 às 07:23h (figura 108).

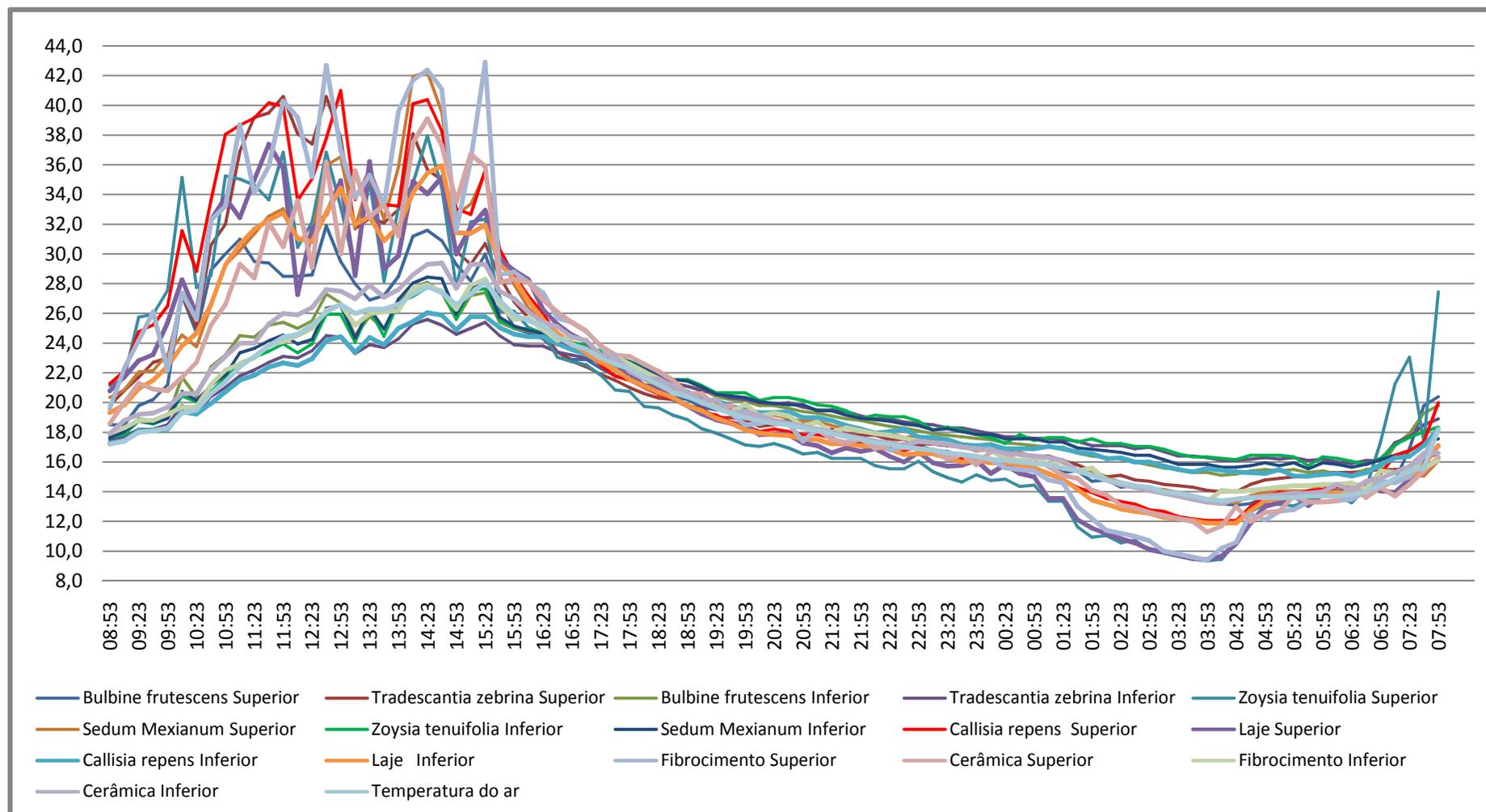


figura 108 - Gráfico de temperatura superficial dos dias 07 a 09/10/2014
Fonte: A Autora (2015)

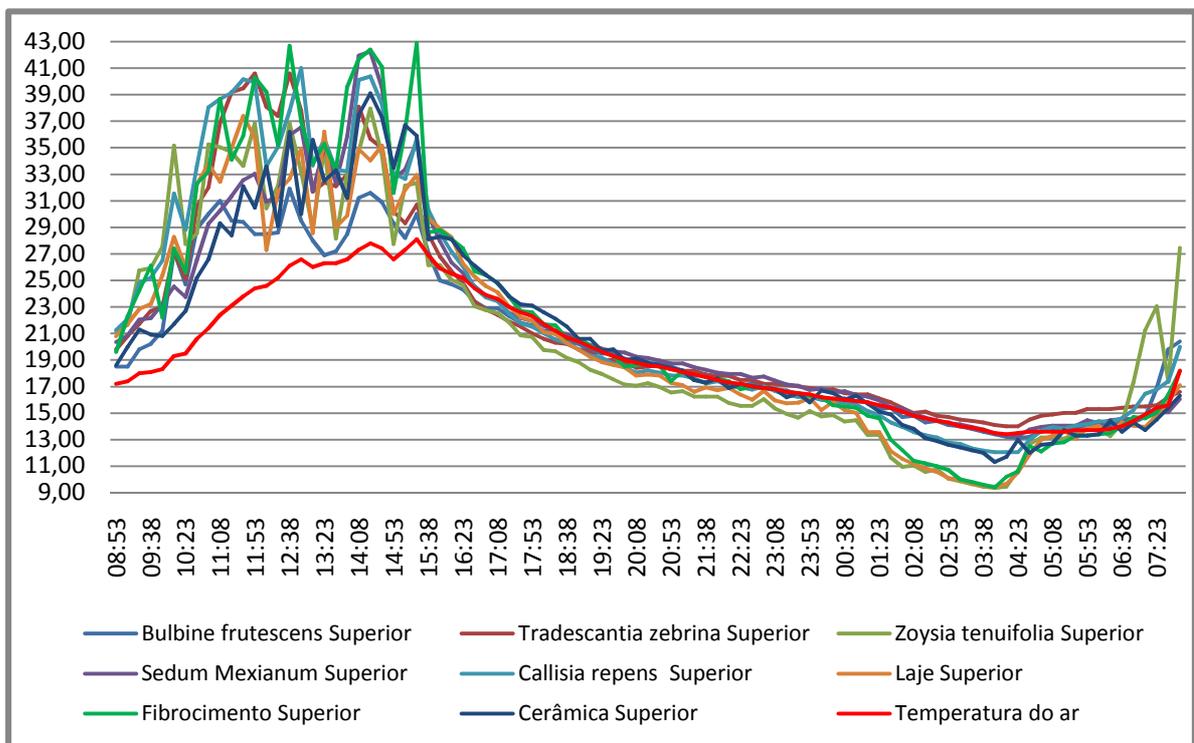


figura 109 - Gráfico de temperatura superficial superior dos dias 08 e 09/10/2014
Fonte: A Autora (2015)

Na figura 109 são comparadas as temperaturas superficiais superiores dos módulos juntamente com a temperatura do ar, que visualmente já podem ser divididas em dois grupos de análise, durante o dia e durante a noite.

No período diurno são observados alguns efeitos que podem estar associados à condição de cada espécie. A *Bulbine frutescens* apresenta as temperaturas mais baixas ao longo do dia, mais próximas à temperatura do ar registrada, podendo este fato estar associado à altura da vegetação, que cria um sombreamento sobre o substrato, reduzindo a incidência solar direta e a capacidade de retenção de água em suas folhas e raízes. No período noturno, a espécie *Zoysia tenuifolia* apresentou temperatura mais baixa entre os sistemas de telhado verde, temperatura similar à da laje, podendo, este efeito ser explicado pela ação dos ventos sobre a superfície, aumentando a troca de calor através da convecção, perdendo calor para o meio, e devido à exposição do termopar nesses sistemas (telhado verde com espécie *Zoysia tenuifolia* e telhados convencionais). A *Tradescantia zebrina*, que absorveu mais calor durante o dia, perdeu de forma mais

lenta calor durante a noite, apresentando temperaturas superiores à temperatura do ar.

Os telhados convencionais, durante o dia, absorveram a radiação térmica apresentando temperaturas elevadas, superiores à da laje, e a noite perderam rapidamente calor para o meio, apresentando temperaturas inferiores à temperatura do ar (figura 109) esse fato pode ser associada à capacidade térmica dos materiais.

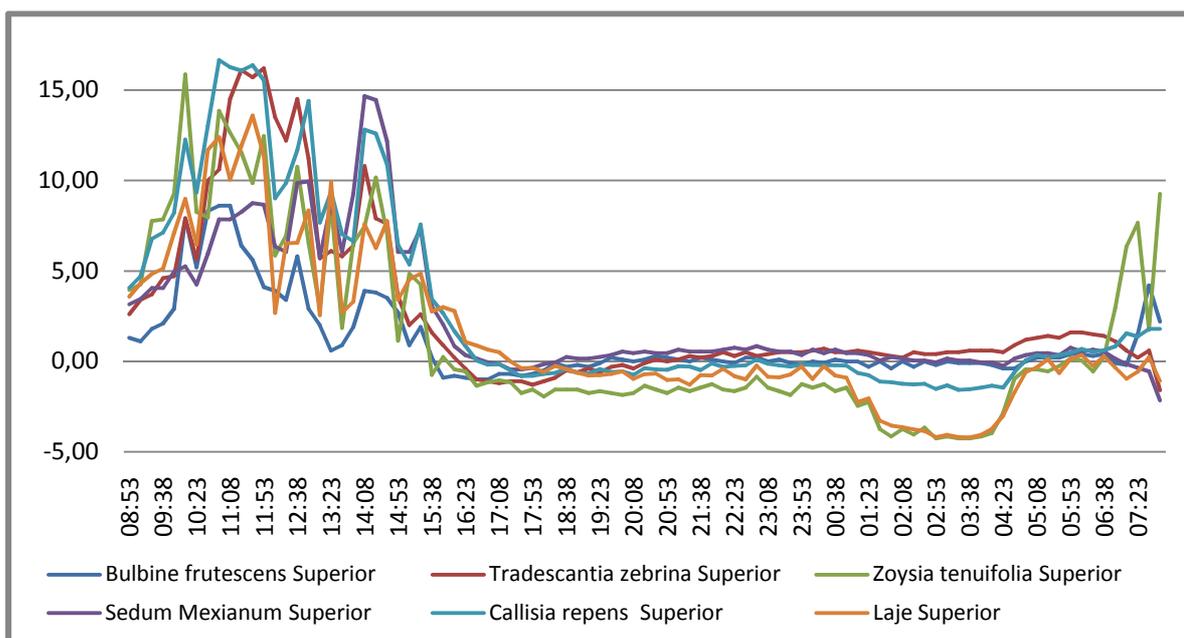


figura 110 - Gráfico representado a diferença entre a temperatura superior e a temperatura do ar - ($\Delta t = \text{tempSup} - \text{TempAr}$) dos sistemas de telhado verde e laje 08 e 09/10/2014
Fonte: A autora (2015)

O gráfico apresentado na figura 110 demonstra a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura superior dos módulos de telhado verde e da laje. Identifica-se com clareza a espécie *Bulbine frutescens*, durante o período do dia, com a temperatura mais próxima à temperatura do ar, ou seja, o efeito da radiação é menor. As espécies de coloração arroxeada *Tradescantia zebrina* e *Callisia repens*, absorveram mais calor durante o dia, apresentando temperaturas mais altas. Entretanto a espécie *Tradescantia Zebrina*, apresentou temperatura mais alta durante a noite quando comparada com a espécie *Callisia repens*, podendo estar associada a altura da espécie e a densidade da mesma.

tabela 13 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais superiores dos módulos 08 e 09/10/2014 (Dados: Apêndice B)

| | <i>Bulbine frutescens</i> Superior | <i>Tradescantia zebrina</i> Superior | <i>Zoysia tenuifolia</i> Superior | <i>Sedum mexicanum</i> Superior | <i>Callisia repens</i> Superior | Laje Superior | Fibrocimento Superior | Cerâmica Superior | Temperatura do ar |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| T Mínima | 13,10 | 14,00 | 9,35 | 13,25 | 12,06 | 9,44 | 9,40 | 11,30 | 13,40 |
| T Máxima | 31,90 | 40,60 | 37,95 | 42,25 | 41,00 | 37,39 | 42,90 | 39,10 | 28,10 |
| T Média | 20,33 | 21,84 | 20,18 | 19,88 | 20,64 | 21,60 | 20,35 | 20,25 | 22,10 |
| Amplitude | 18,80 | 26,60 | 28,60 | 29,00 | 28,94 | 27,94 | 33,50 | 27,80 | 14,70 |

Fonte: A Autora (2015)

Na tabela 13 podem-se destacar alguns resultados. A média de temperatura do ar no dia analisado foi de 22,1°C e as demais coberturas variaram entre 19,9°C (*Sedum Mexicanum*) até 21,8°C (*Tradescantia zebrina*). A cobertura que apresentou a temperatura mínima mais baixa, no período analisado, foi a cobertura com telha de fibrocimento, seguida da laje e da *Zoysia tenuifolia*. O telhado de fibrocimento apresentou também a temperatura mais alta, seguida do *Sedum mexicanum*, da *Tradescantia zebrina* e da *Callisia repens*. A cobertura que apresentou a menor amplitude térmica foi a *Bulbine frutescens*, enquanto a cobertura de fibrocimento apresentou a maior amplitude térmica.

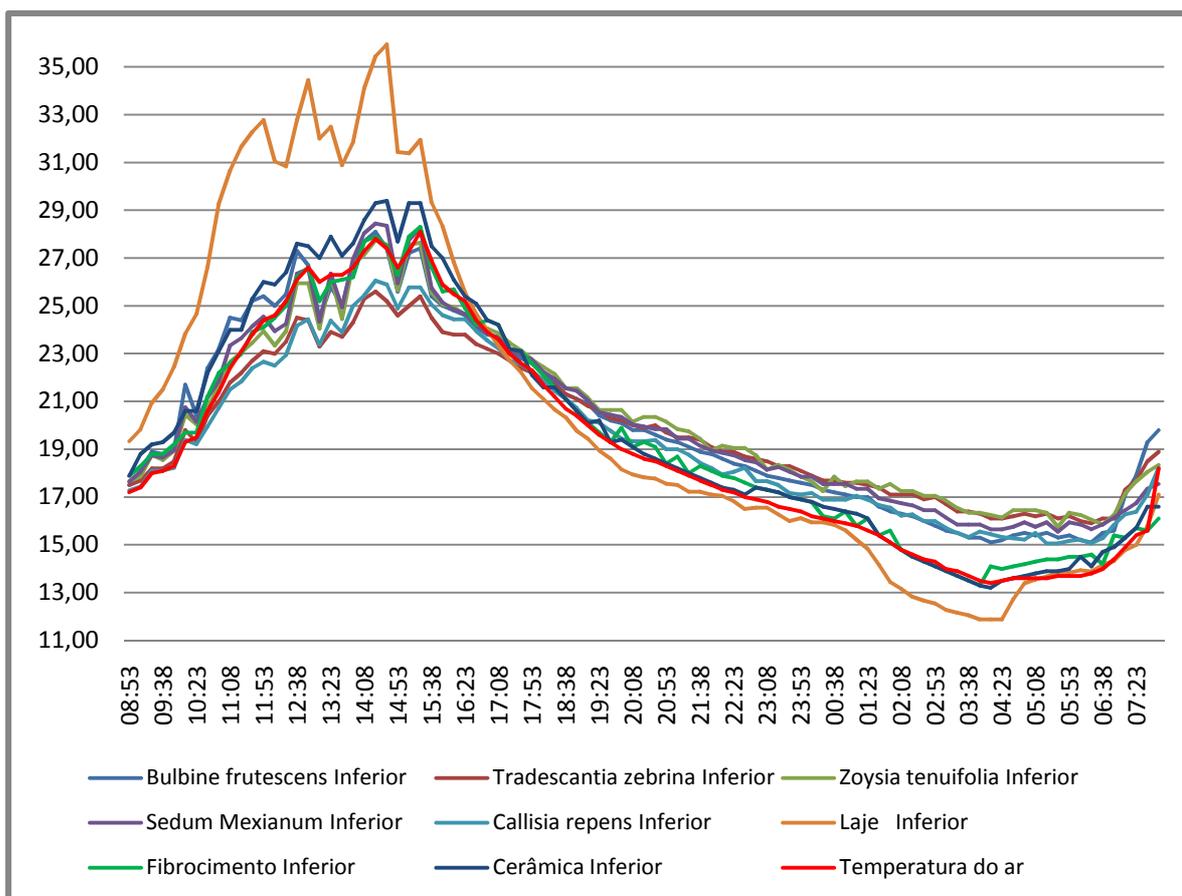


figura 111 - Gráfico de temperatura superficial inferior dias 08 e 09/10/2014
Fonte: A Autora (2015)

Na análise das temperaturas superficiais inferiores (figura 111) o pico térmico ocorreu às 14:38h com uma diferença de temperatura entre a laje (temperatura mais alta registrada) e a trapoeraba (temperatura mais baixa) de 10,7°C. Já no pico mais baixo de temperatura, às 4:08h, a temperatura da laje apresentou uma temperatura 1,5°C mais baixa que a temperatura do ar, enquanto a *Tradescantia zebrina* e a *Zoysia tenuifolia* apresentaram uma temperatura 3,0°C mais alta, ou seja, uma diferença de 4,5°C. A telha cerâmica apresentou a segunda temperatura mais baixa, seguido da telha de fibrocimento. A *Bulbine frutescens*, a *Callisia repens* e o *Sedum Mexianum* apresentaram resultados similares entre si, com aumento médio de 2°C em relação a temperatura do ar. A *Tradescantia zebrina* absorveu mais radiação na superfície superior, entretanto a condução de energia em todo o sistema foi mais lenta, desta forma, durante o dia apresentou temperatura inferior mais baixa e durante a noite a temperatura inferior foi mais alta, ou seja, teve uma variação de temperatura menor ao longo do dia.

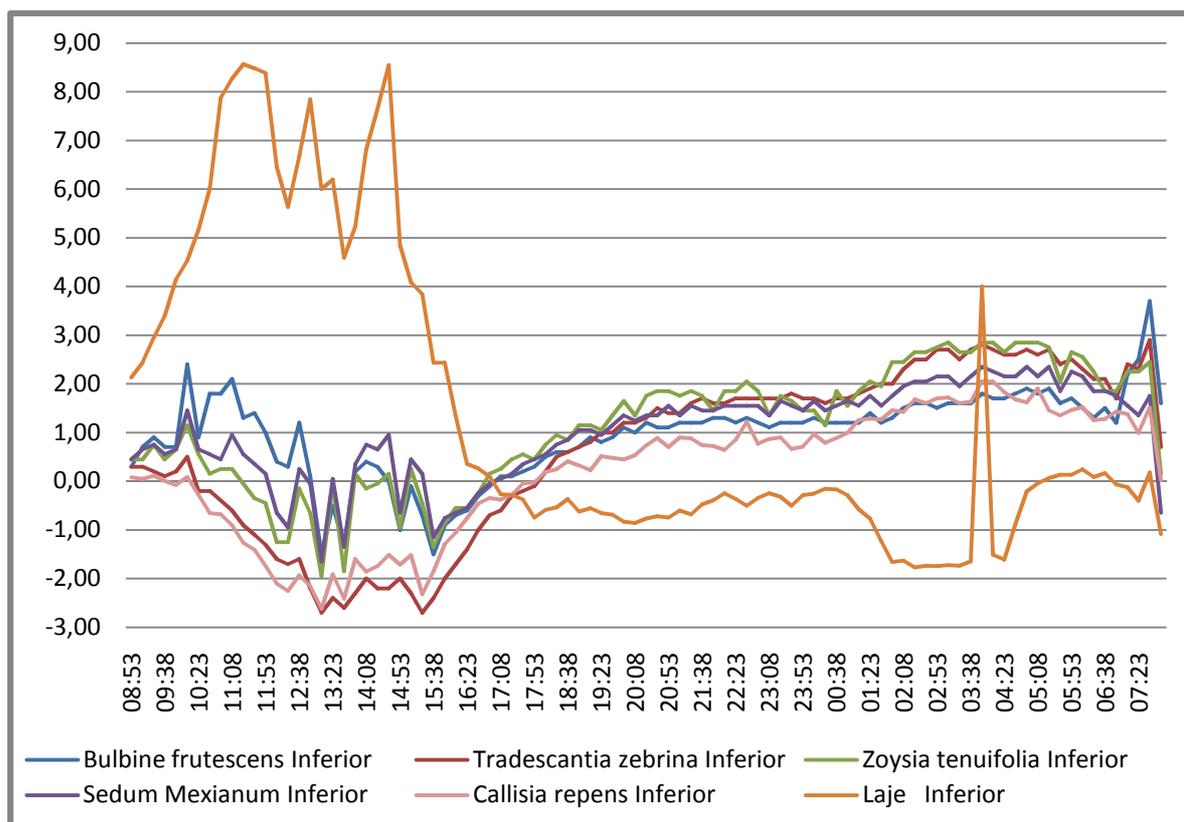


figura 112 - Gráfico representado a diferença entre a temperatura inferior e a temperatura do ar ($\Delta t = \text{tempSup} - \text{TempAr}$) dos sistemas de telhado verde e laje 08 e 09/10/2014
Fonte: A autora (2015)

tabela 14 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais inferiores dos módulos 08 e 09/10/2014

| | <i>Bulbine frutescens</i> Inferior | <i>Tradescantia zebrina</i> Inferior | <i>Zoysia tenuifolia</i> Inferior | <i>Sedum mexicanum</i> Inferior | <i>Callisia repens</i> Inferior | Laje Inferior | Fibrocimento Inferior | Cerâmica Inferior | Temperatura do ar |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| T Mínima | 15,10 | 15,90 | 15,75 | 15,55 | 15,06 | 11,89 | 13,30 | 13,20 | 13,40 |
| T Máxima | 28,10 | 25,60 | 27,75 | 28,45 | 26,06 | 35,94 | 28,30 | 29,40 | 28,10 |
| T Média | 20,62 | 20,22 | 20,73 | 20,65 | 19,82 | 21,29 | 19,98 | 20,33 | 22,10 |
| Amplitude | 13,00 | 9,70 | 12,00 | 12,90 | 11,00 | 24,06 | 15,00 | 16,20 | 14,70 |

Fonte: A Autora (2015)

O gráfico com a amplitude térmica entre os módulos e a temperatura do ar demonstra que a laje, durante o dia, tem um ganho de temperatura chegando a 9°C, enquanto os sistemas de telhado verde registram redução de temperatura de até 2°C (figura 112) em relação a temperatura do ar. No período noturno, a laje demonstra temperaturas inferiores a do ar. Já os telhados verdes, devido ao atraso térmico causado pela capacidade térmica, apresentam temperatura superior a do ar.

As coberturas tradicionais se caracterizaram por absorver calor durante o dia, mas devido à ação dos ventos em conjunto com a baixa capacidade térmica, perdem calor para o meio com maior facilidade durante a noite, podendo este fenômeno ser evidenciado nas temperaturas mínimas e máximas, assim como na amplitude térmica apresentada na tabela 14.

Quando analisada a diferença térmica das temperaturas inferiores (tabela 14) a menor diferença foi registrada pela espécie *Tradescantia zebrina* (9,7°C), seguida das espécies *Callisia repens* (11°C), *Zoysia tenuifolia* (12°C) e *Sedum mexicanum* (12,9°C), a cobertura verde com a maior diferença térmica foi a *Bulbine frutescens* (13°C).

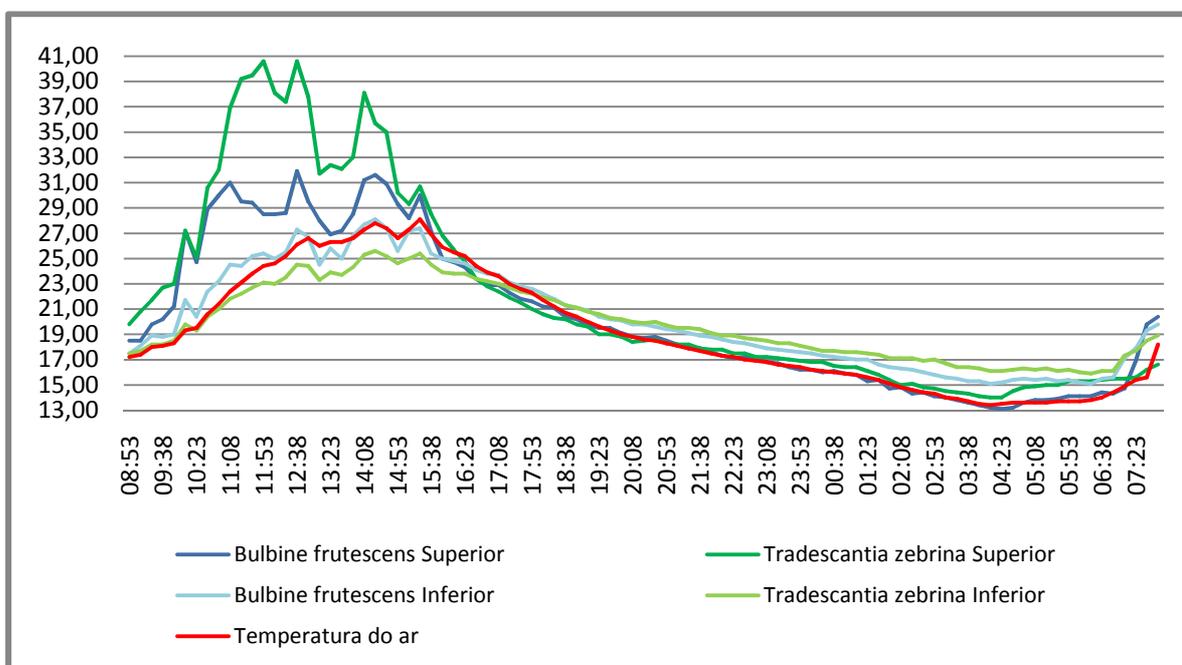


figura 113 - Gráfico temperatura superior e inferior da *Bulbine frutescens* e *Tradescantia zebrina* e temperatura do ar 08 e 09/10/2014
Fonte: A autora (2015)

Analisando a figura 113, onde se compara as espécies *Bulbine frutescens* e *Tradescantia zebrina*, percebe-se que a diferença de temperatura superior e inferior da espécie *Tradescantia zebrina* é superior ao da espécie *Bulbine frutescens*. Isso pode estar associado ao fechamento do solo e altura das plantas (figura 115, figura 114). A espécie *Bulbine frutescens* permite maior troca de calor devido à exposição do substrato, entretanto retém maior quantidade de água em suas folhas e raízes, conforme tabela 11, essas características podem influenciar a apresentar uma

temperatura superficial superior mais baixa e temperatura superficial inferior mais alta (figura 113).



figura 114 - Módulo telhado verde espécie *Bulbine frutescens* 07/10/2014
Fonte: A autora (2015)



figura 115 - Módulo telhado verde espécie *Tradescantia zebrina* 07/10/2014
Fonte: A autora (2015)

4.2.2 Evento 02: 07 a 10 de novembro de 2014

O segundo evento caracterizado foi dos dias 07 a 10/11/2014, com precipitação registrada de 30,4mm. Devido à sensibilidade dos sensores à água foram instalados apenas os sensores inferiores e não realizada a medição da temperatura do ar. Desta forma a comparação foi feita entre a temperatura dos diferentes módulos.

O índice de insolação no dia 07/11 foi de zero horas e, desta forma, a amplitude térmica das coberturas e do ar, conforme dados do Inmet (2015), foi baixa, pois não havia a ação da radiação solar neste período. Analisando as temperaturas inferiores, durante o período diurno, a laje apresentou temperatura mais elevada, com até 2°C acima da temperatura dos telhados verdes. No período noturno, os sistemas tradicionais apresentaram as temperaturas mais baixas registradas e a espécie *Zoysia tenuifolia* as temperaturas mais altas, seguida dos demais sistemas de telhado verde (figura 116).

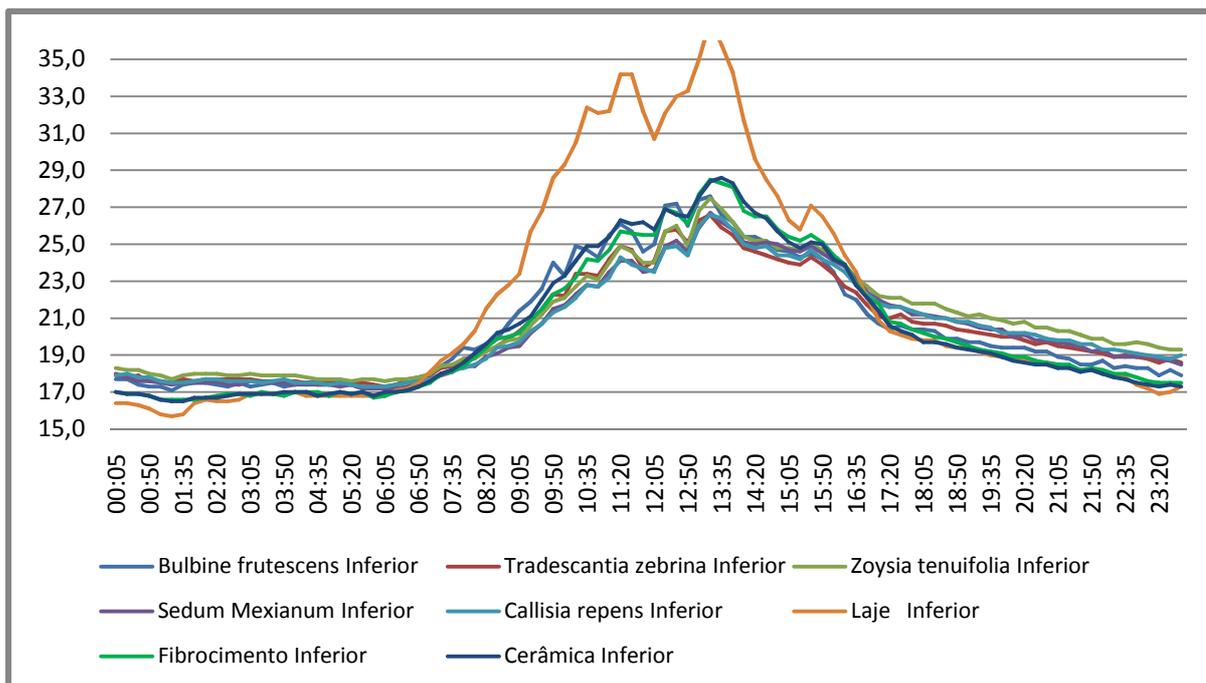


figura 116 - Gráfico de temperatura superficial inferior dia 07/11/2014
Fonte: A Autora (2015)

Quando analisada a amplitude térmica desses sistemas pode-se perceber que a laje apresentou uma amplitude quase 2,5 vezes maior que a das espécies *Zoysia tenuifolia* e *Callisia repens*. Entre as espécies para telhados verdes analisadas, a *Bulbine frutescens* apresentou a maior amplitude térmica (3,2°C), ainda assim menor que dos sistemas com telhado de fibrocimento (4,0°C) e cerâmica (4,1°C) (tabela 15). Essa variação pode ser associada a água retida nas plantas (folhas, caules e raízes) nos sistemas de telhado verde, que aumentam a capacidade térmica do sistema, reduzindo a variação de temperatura.

tabela 15 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais inferiores 07/11/2014

| | <i>Bulbine frutescens</i> Inferior | <i>Tradescantia zebrina</i> Inferior | <i>Zoysia tenuifolia</i> Inferior | <i>Sedum mexicanum</i> Inferior | <i>Callisia repens</i> Inferior | Laje Inferior | Fibrocimento Inferior | Cerâmica Inferior |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------------|-------------------|
| T Mínima | 17,70 | 17,90 | 18,40 | 17,80 | 18,00 | 16,40 | 17,00 | 17,00 |
| T Máxima | 20,90 | 20,80 | 21,10 | 20,70 | 20,70 | 22,70 | 21,00 | 21,10 |
| T Média | 19,13 | 19,20 | 19,58 | 19,17 | 19,22 | 18,97 | 18,78 | 18,83 |
| Amplitude | 3,20 | 2,90 | 2,70 | 2,90 | 2,70 | 6,30 | 4,00 | 4,10 |

Fonte: A Autora (2015)

No dia 09/11/2014, conforme dados do Inmet (2015), a insolação foi de 11,1 horas, desta forma, podemos perceber a influência da insolação na análise de temperatura. No pico mais alto de temperatura, a laje apresentou uma temperatura de 36°C e a *Bulbine frutescens* e a *Tradescantia zebrina* registraram 27°C, ou seja uma variação de 9°C entre os sistemas. No período noturno essa variação é menor mas registrou uma amplitude de 4°C entre a laje e a *Zoysia tenuifolia*.

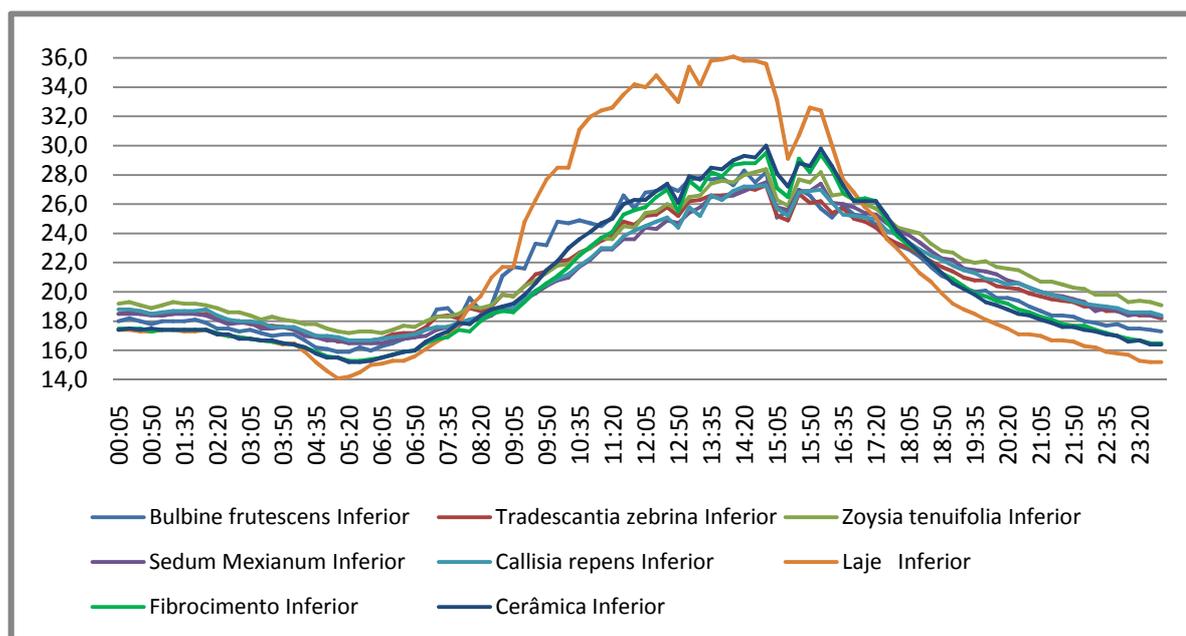


figura 117 - Gráfico de temperatura superficial inferior dia 09/11/2014
Fonte: A Autora (2015)

tabela 16 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais inferiores 09/11/2014

| | <i>Bulbine frutescens</i> Inferior | <i>Tradescantia zebrina</i> Inferior | <i>Zoysia tenuifolia</i> Inferior | <i>Sedum mexicanum</i> Inferior | <i>Callisia repens</i> Inferior | Laje Inferior | Fibrocimento Inferior | Cerâmica Inferior |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------------|-------------------|
| T Mínima | 15,90 | 16,60 | 17,20 | 16,50 | 16,70 | 14,10 | 15,30 | 15,20 |
| T Máxima | 28,30 | 27,30 | 28,40 | 27,50 | 27,30 | 36,10 | 29,50 | 30,00 |
| T Média | 21,01 | 20,95 | 21,63 | 20,86 | 20,91 | 22,27 | 20,59 | 20,78 |
| Amplitude | 12,40 | 10,70 | 11,20 | 11,00 | 10,60 | 22,00 | 14,20 | 14,80 |

Fonte: A Autora (2015)

Analisando a amplitude térmica e as temperaturas mínimas e máximas, destaca-se que a menor amplitude foi do *Arachis repens* (10,6°C), com temperaturas

próximas a *Tradescantia zebrina* (10,7°C) e ao *Sedum mexicanum* (11,0°C). Novamente, entre as espécies analisadas, a bulbine apresentou a maior amplitude (12,4°C) e a menor temperatura mínima (15,9°C). Os sistemas de cobertura tradicionais apresentaram amplitude de 22,0°C a 14,2°C (laje e fibrocimento, respectivamente) e apresentaram mínimas e máximas superiores aos telhados verdes (tabela 16).

4.2.3 Evento 03: 07 a 09 de janeiro de 2014

Dos eventos analisados na presente pesquisa, segundo o Inmet (2015), o levantamento dos dias 07 a 09/01/2015 (figura 118) foram com as temperaturas mais elevadas, com máxima de 31,2°C e mínima de 18,6°C. Destacamos na próxima análise um recorte do dia 07/01, às 17:07 h, ao dia 08/01, às 16:57 h. A análise dos dias posteriores foram feitas apenas com os sensores inferiores devido à precipitação registrada e são destacados na figura 118.

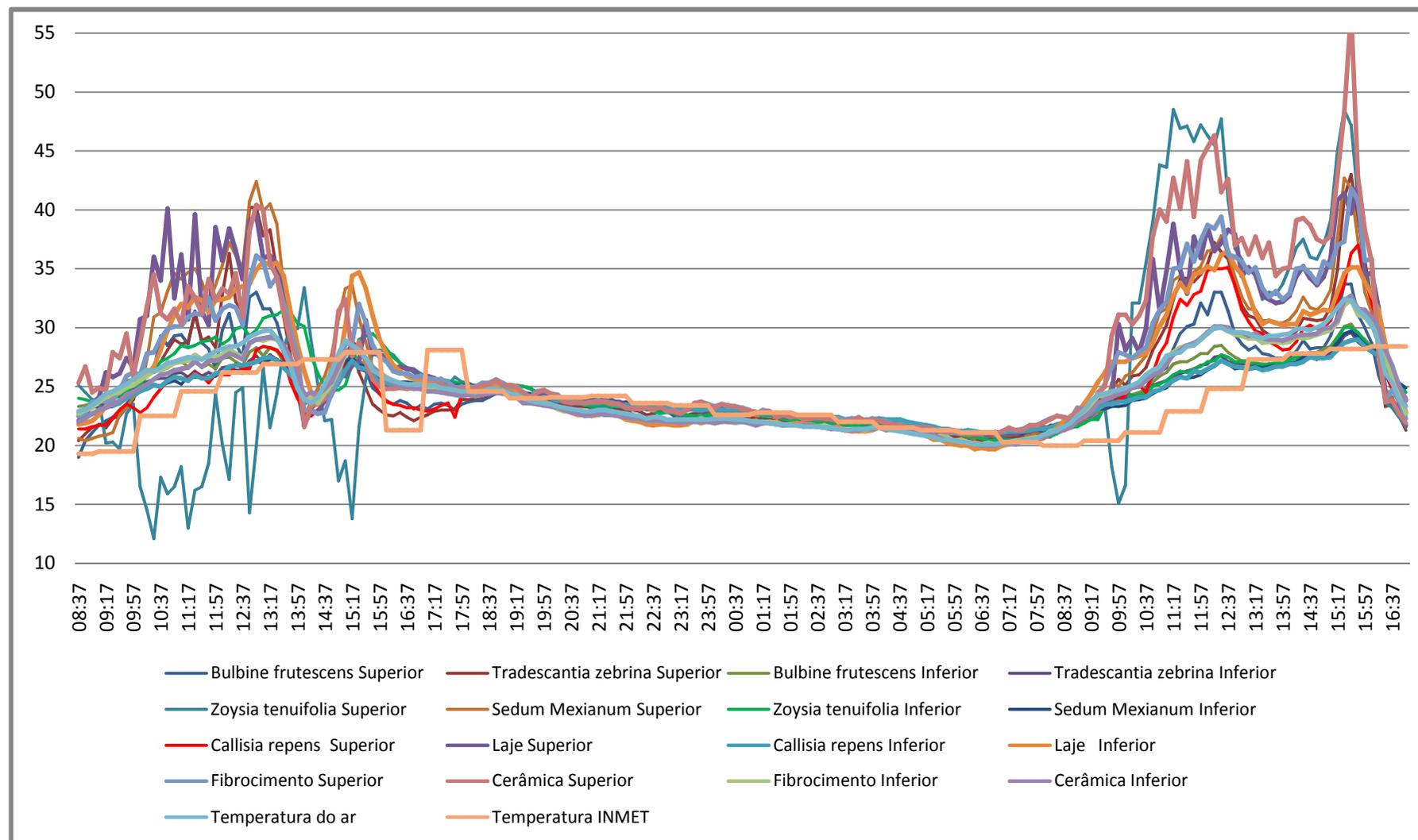


figura 118 - Gráfico de temperatura superficial dia 07 a 09/01/2015
Fonte: A Autora (2015)

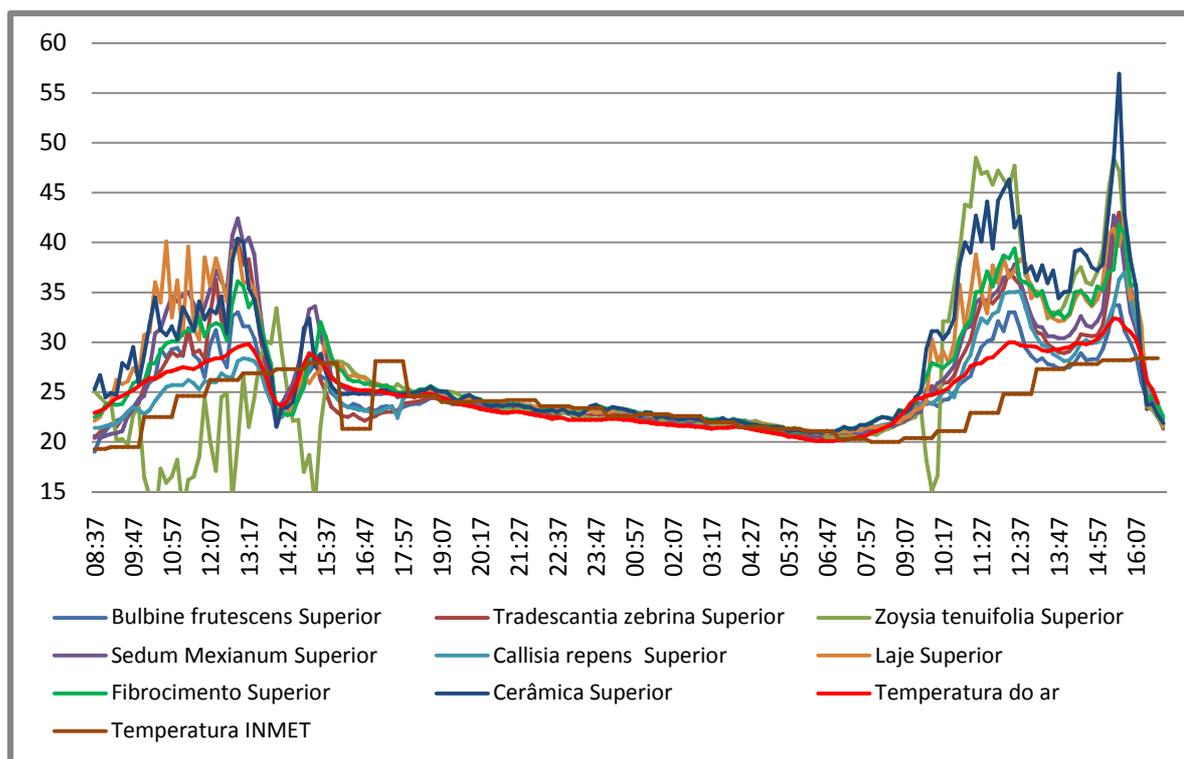


figura 119 - Gráfico de temperatura superficial superior dias 07 e 08/01/2015
 Fonte: A Autora (2015)

Na análise comparativa entre as temperaturas superficiais superiores, pode-se perceber que o pico mais alto de temperatura foi apresentado pelo sistema de telha cerâmica, com temperatura de até 56,9°C. Nesse mesmo horário, a espécie vegetal que apresentou a menor temperatura foi a *Bulbine frutescens* com temperatura de 33,7°C, ou seja, uma variação térmica de 23,2°. Entre os telhados verdes analisados, a espécie *Zoysia tenuifolia* apresentou as temperaturas mais altas, isso se deve ao fato do sensor nessa espécie ficar exposto à radiação solar, com temperaturas superiores à laje e próximas à cobertura cerâmica.

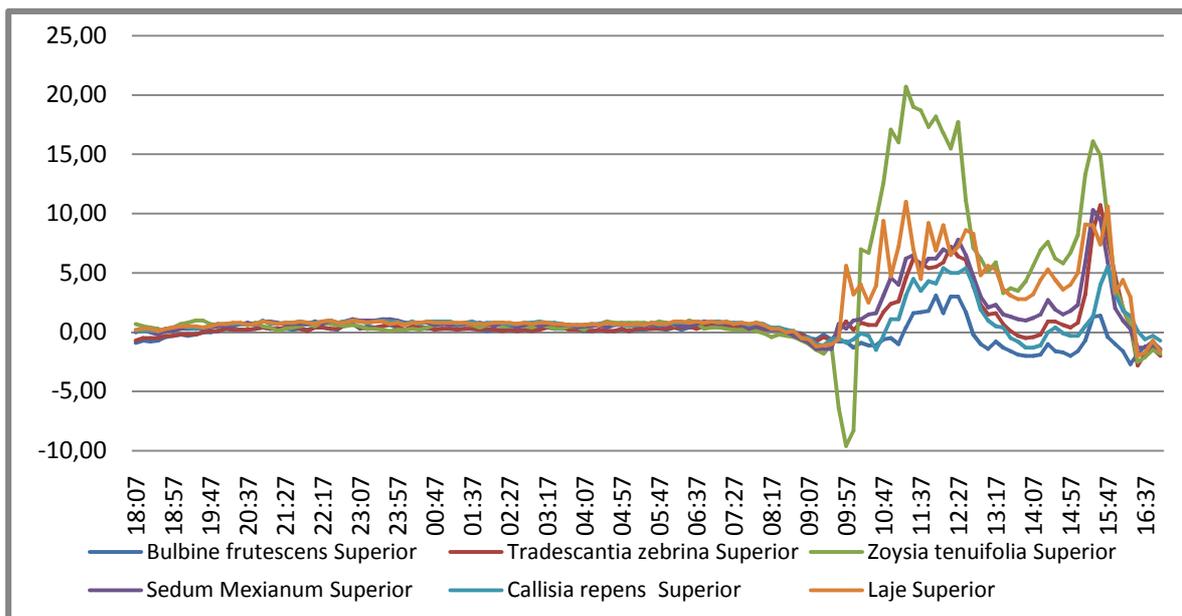


figura 120 - Gráfico representado a diferença entre a temperatura superior e a temperatura do ar - ($\Delta t = \text{tempSup} - \text{TempAr}$) dos sistemas de telhado verde e laje 07 e 08/01/2015
Fonte: A autora (2015)

Neste recorte, a maioria das medições apresentou temperatura superior a temperatura do ar. Destaca-se a espécie grama coreana (*Zoysia tenuifolia*) com as temperaturas mais altas, com amplitude superior aos 20°C. A espécie *Bulbine frutescens* apresentou uma amplitude inferior a 5°C, com algumas temperaturas abaixo da temperatura do ar, resultado similar ao dinheiro em penca (*Callisia repens*). A laje registrou a segunda maior variação entre as coberturas analisadas (figura 120).

A temperatura mais elevada na espécie *Zoysia tenuifolia* pode estar associada à exposição do sensor a radiação solar direta. Nas demais espécies vegetais, o sensor ficou posicionado sob o substrato com sombreamento das folhas (figura 121).

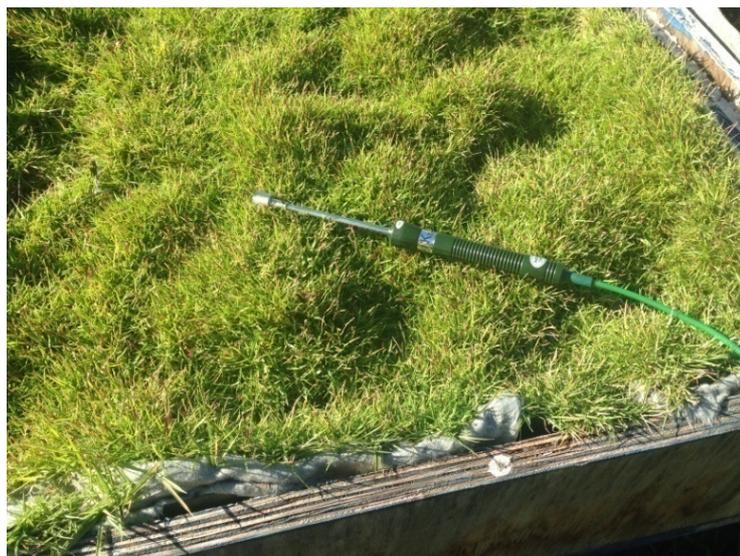


figura 121 - Sensor sobre o sistema de telhado verde com a espécie *Zoysia tenuifolia*.
Fonte: A autora (2015)

tabela 17 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais superiores dos módulos 08 e 09/10/2014

| | <i>Bulbine frutescens</i> Superior | <i>Tradescantia zebrina</i> Superior | <i>Zoysia tenuifolia</i> Superior | <i>Sedum mexicanum</i> Superior | <i>Callisia repens</i> Superior | Laje Superior | Fibrocimento Superior | Cerâmica Superior | Temperatura do ar |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| T Mínima | 19,60 | 19,90 | 15,10 | 19,30 | 20,50 | 19,80 | 20,30 | 20,40 | 18,80 |
| T Máxima | 36,60 | 43,00 | 48,50 | 42,70 | 37,20 | 42,90 | 41,80 | 56,90 | 33,30 |
| T Média | 25,27 | 26,55 | 29,30 | 26,32 | 26,36 | 27,94 | 28,03 | 29,56 | 23,07 |
| Amplitude | 17,00 | 23,10 | 33,40 | 23,40 | 16,70 | 23,10 | 21,50 | 36,50 | 14,50 |

Fonte: A Autora (2015)

A análise da tabela 17 corrobora com as informações trazidas anteriormente, destacando a espécie *Zoysia tenuifolia* com a maior amplitude térmica entre os telhados verdes, o *Callisia repens* e a *Bulbine frutescens* registraram as menores amplitudes. A amplitude entre a temperatura máxima da *Bulbine frutescens* e da *Zoysia tenuifolia* chega a 12°C.

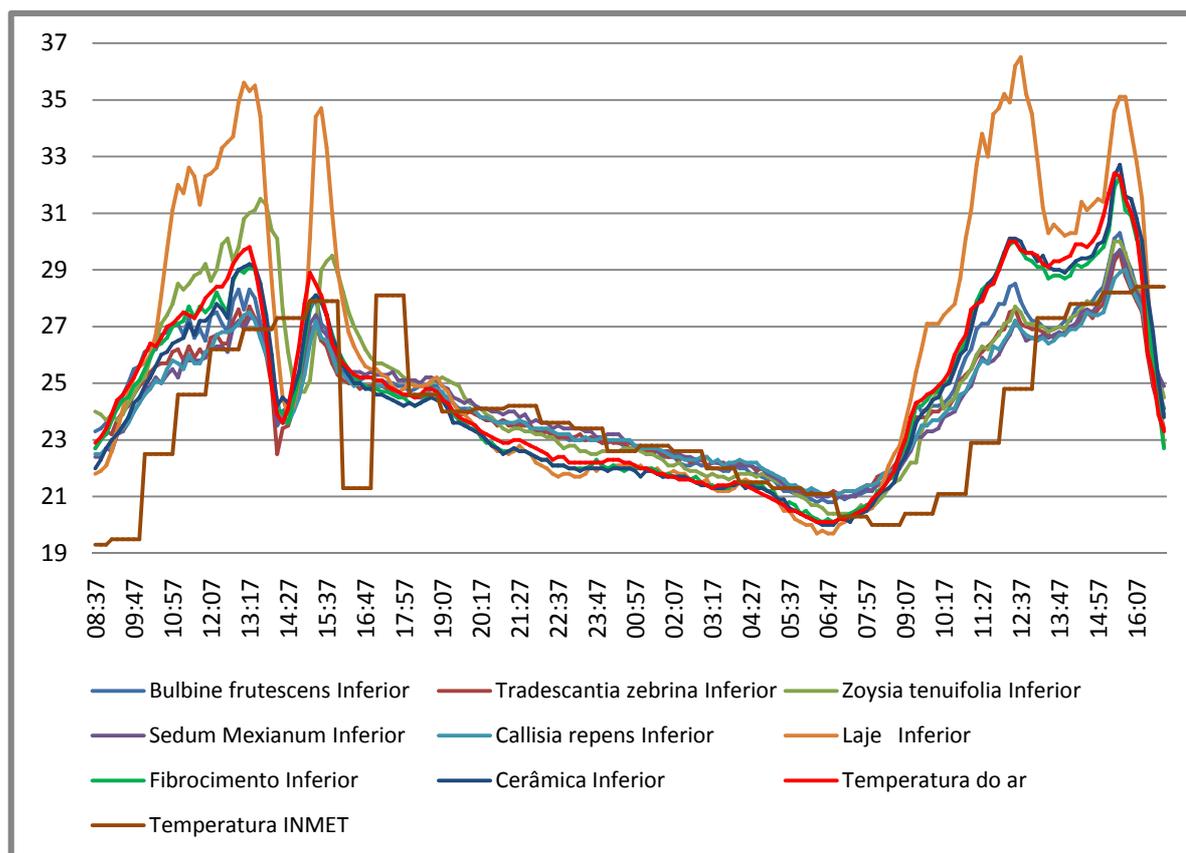


figura 122 - Gráfico de temperatura superficial inferior dias 07 e 08/01/2015
Fonte: A Autora (2015)

Analisando as temperaturas superficiais inferiores, no recorte de data dos dias 07 e 08/01/2015, a espécie *Zoysia tenuifolia* se destaca com as menores temperaturas e menor variação de temperatura ao longo do dia. Essa característica pode estar associada ao fechamento uniforme das folhas sob o substrato reduzindo a troca de calor do substrato com o meio. A espécie *Zoysia tenuifolia* registrou uma diferença de temperatura em relação à laje de 7°C (figura 122). As coberturas convencionais registraram as temperaturas mais altas ao longo do dia e mais baixas a noite. As coberturas de fibrocimento e cerâmica apresentaram temperatura similar à temperatura do ar.

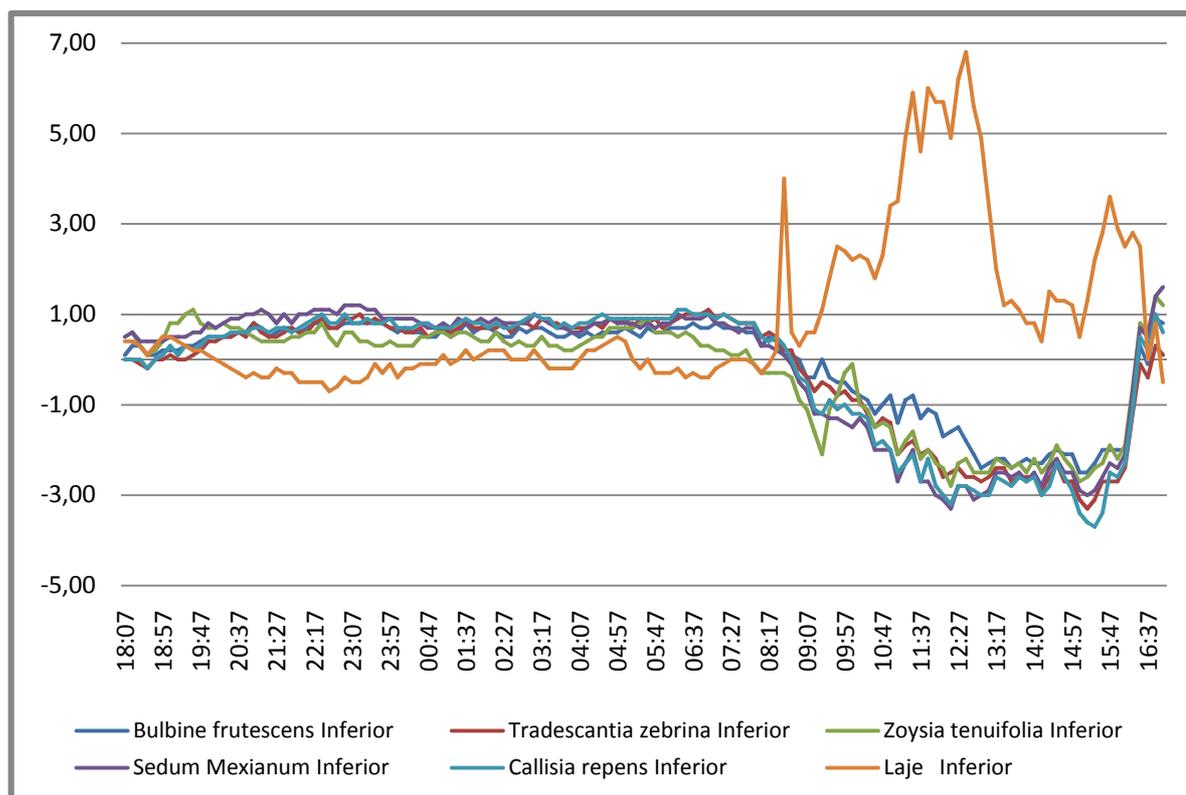


figura 123 - Gráfico representado a diferença entre a temperatura superior e a temperatura do ar - ($\Delta t = \text{tempInf} - \text{TempAr}$) dos sistemas de telhado verde e laje - 07 e 08/01/2015
Fonte: A autora (2015)

Analisando a diferença entre a temperatura superficial inferior com a temperatura do ar, evidencia-se que a laje absorve mais radiação solar em forma de calor e apresenta ao longo do dia temperatura superior à temperatura do ar (em até 6°C). Os sistemas de telhado verde apresentam temperatura inferior à temperatura do ar, podendo ser em decorrência do efeito de evapotranspiração, que reduz a temperatura dos módulos em relação à temperatura do ar, e a capacidade térmica do conjunto. Já no período noturno, com a redução da temperatura do ar, os sistemas de telhado verde apresentam temperaturas superiores a do ar e dos sistemas tradicionais de cobertura, ou seja, mantêm as temperaturas mais constantes ao longo do dia e da noite, apresentando menor variação térmica.

tabela 18 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais inferiores dos módulos 07 e 08/01/2015

| | <i>Bulbine frutescens</i> Inferior | <i>Tradescantia zebrina</i> Inferior | <i>Zoysia tenuifolia</i> Inferior | <i>Sedum Mexianum</i> Inferior | <i>Callisia repens</i> Inferior | Laje Inferior | Fibrocimento Inferior | Cerâmica Inferior | Temperatura do ar |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| T Mínima | 19,80 | 20,30 | 20,40 | 20,00 | 20,30 | 18,10 | 18,80 | 18,60 | 18,80 |
| T Máxima | 30,80 | 30,10 | 31,00 | 30,90 | 30,10 | 36,50 | 32,40 | 33,00 | 33,30 |
| T Média | 23,91 | 23,74 | 23,92 | 23,78 | 23,73 | 24,48 | 23,71 | 23,70 | 23,86 |
| Amplitude | 11,00 | 9,80 | 10,60 | 10,90 | 9,80 | 18,40 | 13,60 | 14,40 | 14,50 |

Fonte: A Autora (2015)

Observando a tabela 21, pode-se perceber que a laje apresentou uma amplitude térmica 2 vezes maior que alguns sistemas de telhado verde e uma temperatura máxima até seis graus mais alta. A temperatura mínima também foi menor 2°C em média. Pode-se, desta forma, concluir que os telhados verdes mantêm a temperatura mais constante ao longo de um dia de calor, sendo as espécies *Tradescantia zebrina* e *Arachis repens* as que apresentaram a menor variação térmica ao longo do dia.

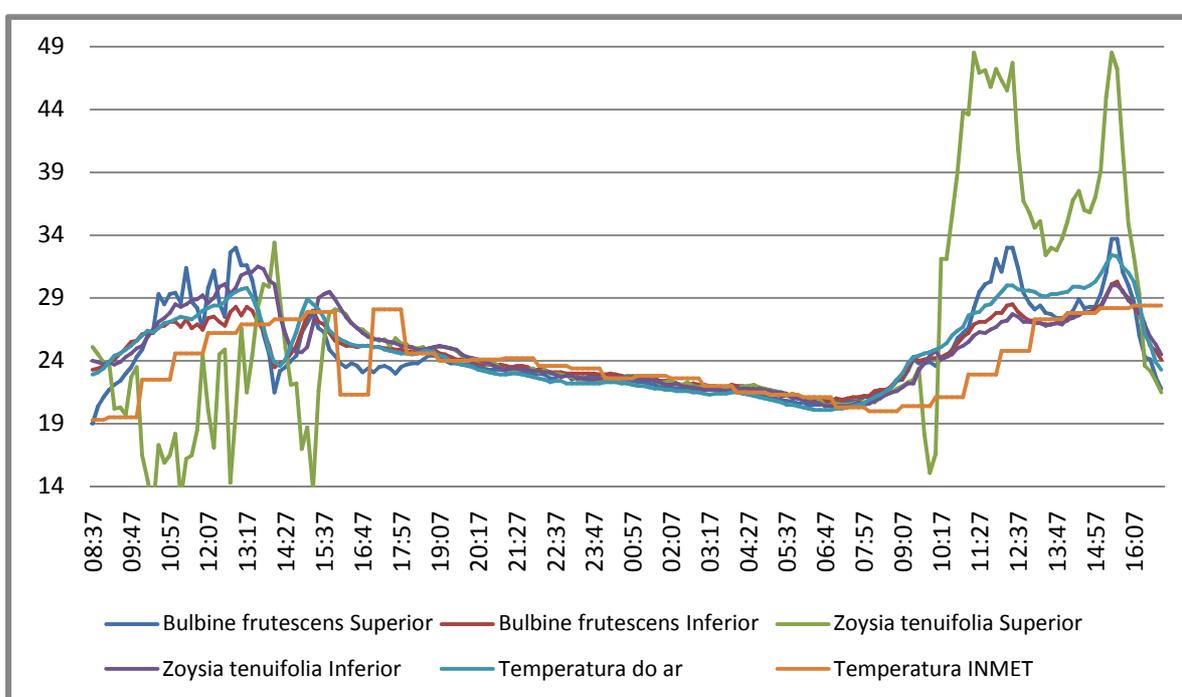


figura 124 - Gráfico de temperatura superficial superior e inferior: *Bulbine frutescens*, *Zoysia tenuifolia* e temperatura do ar dias 07 e 08/01/2015

Fonte: A Autora (2015)

Na figura 124 compara-se os sistemas de telhado verde com *Zoysia tenuifolia* e *Bulbine frutescens* quanto a temperatura superficial superior e inferior. Pode-se perceber que a grama coreana, mesmo com uma temperatura superior muito alta, conduziu essa temperatura para o sistema, ou seja, o sistema não absorveu todo o calor acumulado. Já a espécie bulbine apresentou uma variação entre a temperatura superior e inferior muito pequena, que se manteve quase constante, ou seja, a massa densa e uniforme que a grama coreana cria na superfície reduz a troca de calor do substrato com o meio, enquanto no caso da bulbine, onde o substrato fica exposto a ação do vento, a troca por convecção é maior.

4.2.4 Evento 05: 09 e 10 de abril de 2014

Nos dados levantados no mês de abril, dias 09 e 10, a temperatura variou entre 25°C e 13,3°C segundo o Inmet (2015). Destaca-se esse experimento, pois se optou por deixar o sensor de temperatura do ar sobre os módulos e não abaixo, conforme os outros experimentos. Devido à insolação sobre o sensor, que no dia 09 foi de 8,2 horas e no dia 09 de 5,6 horas (INMET, 2015), o sensor de temperatura do ar apresentou temperatura máxima de 43,80°C, 18,8°C acima da temperatura registrada pelo Inmet, e mínima de 11,40°C (figura 125 - Gráfico de temperatura superficial dia 09 a 10/04/2015 figura 125).

Analisando a figura 125 podemos perceber de forma clara a variação entre a temperatura do ar, segundo dados do Inmet (2015), e a temperatura medida *in loco*. O recorte de dados utilizados e destacado nos gráficos a seguir são do dia 09/04 às 8:53h até 10/04 às 10:23h. A temperatura registrada pelo Inmet foi inferior a medida de temperatura registrada *in loco* das 7 às 15 horas e superior das 16 às 7 horas.

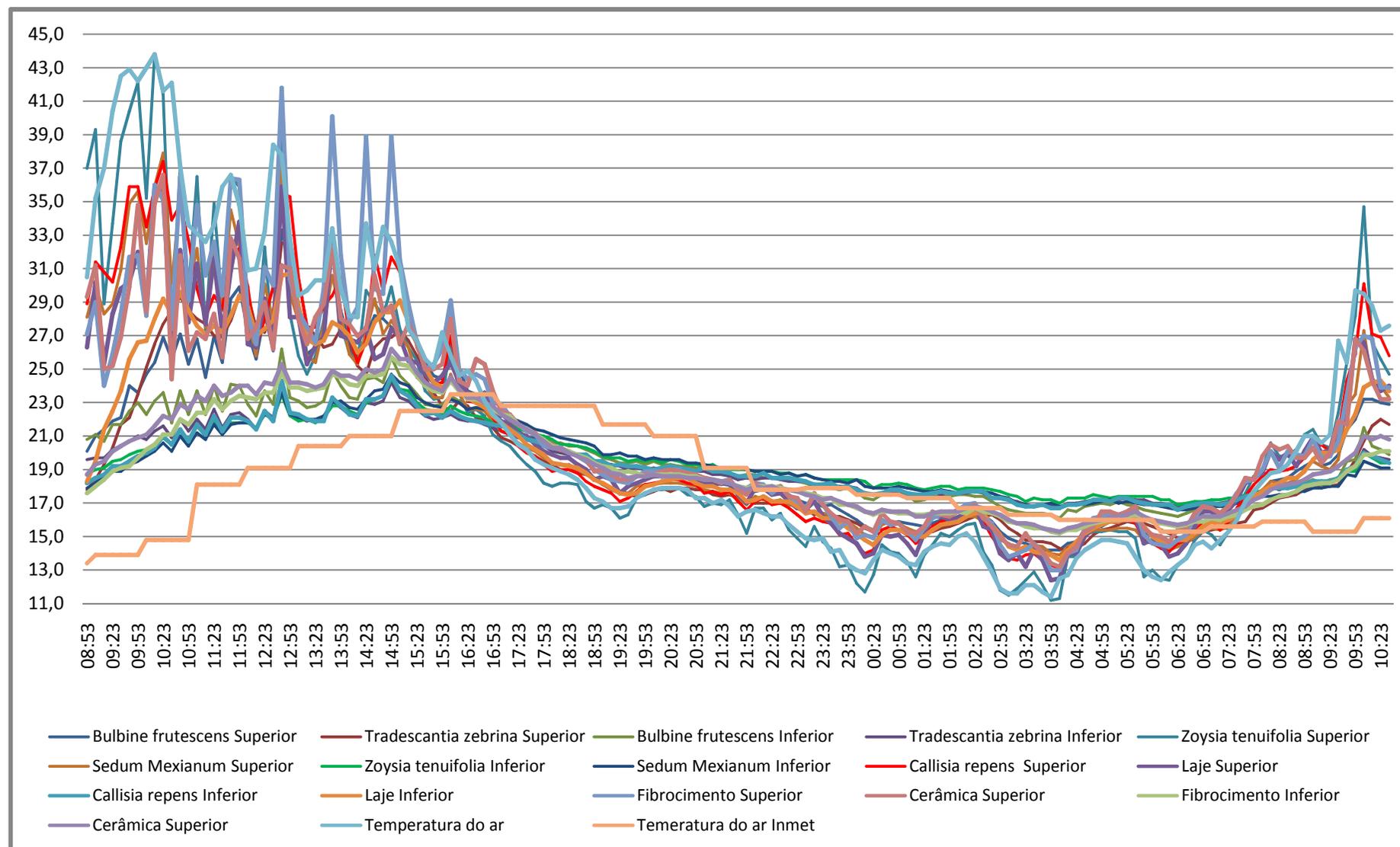


figura 125 - Gráfico de temperatura superficial dia 09 a 10/04/2015
 Fonte: A Autora (2015)

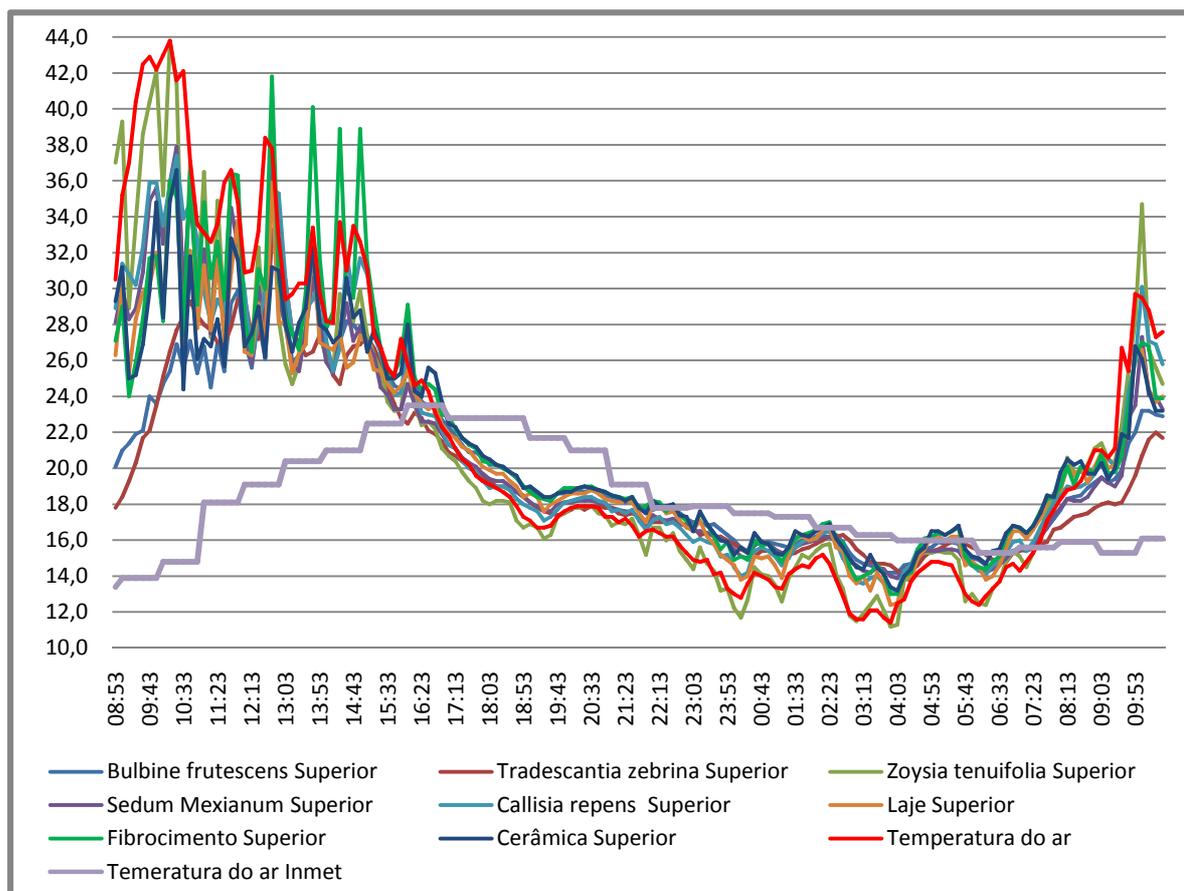


figura 126 - Gráfico de temperatura superficial superior dia 09 a 10/04/2015
Fonte: A Autora (2015)

A alta incidência solar das 08:00 às 17:00 horas pode ser percebida na figura 126. Comparando os sistemas de cobertura, quanto à temperatura superficial superior, o telhado de fibrocimento apresentou os maiores picos de temperatura das 12:00 às 16:00 horas. No início da manhã, o telhado verde com a espécie *Zoysia tenuifolia* apresentou as temperaturas mais elevadas, enquanto a *Bulbine frutescens* apresentou as menores temperaturas, juntamente com a *Tradescantia zebrina*, assim como apresentaram a menor amplitude térmica, conforme tabela 19.

No período noturno, destaca-se a *Zoysia tenuifolia* com a temperatura superior mais baixa e próxima da temperatura do ar. Isso se deve ao fato dos dois sensores estarem igualmente expostos. As demais coberturas apresentaram resultados similares entre si.

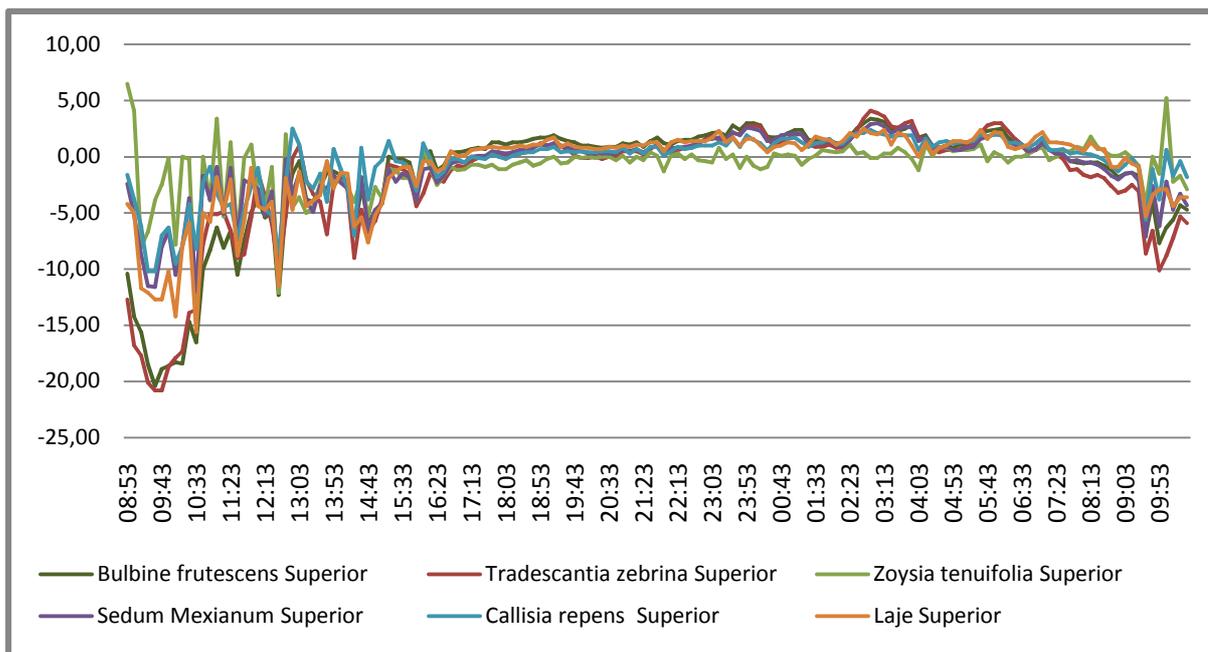


figura 127 - Gráfico da diferença entre a temperatura superior e a temperatura do ar ($\Delta t = \text{tempSup} - \text{TempAr}$) dos sistemas de telhado verde e laje 09 e 10/04/2015
Fonte: A autora (2015)

Na figura 127, diferente das análises anteriores, os módulos apresentaram temperatura inferior à temperatura do ar ao longo do dia em consequência da posição do sensor de temperatura do ar. A *Bulbine frutescens* e a *Tradescantia zebrina* apresentaram a maior amplitude com relação à temperatura do ar. Este efeito pode estar associado à altura e sombreamento da bulbine e a densidade da *Tradescantia zebrina* registrando temperaturas muito menores que a do ar. A espécie *Zoysia tenuifolia* apresentou a menor amplitude durante a noite e as temperaturas mais baixas entre os sistemas analisados.

tabela 19 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais superiores - 09 e 10/04/2015

| | <i>Bulbine frutescens</i> Superior | <i>Tradescantia zebrina</i> Superior | <i>Zoysia tenuifolia</i> Superior | <i>Sedum mexicanum</i> Superior | <i>Callisia repens</i> Superior | Laje Superior | Fibrocimento Superior | Cerâmica Superior | Temperatura do ar |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| T Mínima | 14,20 | 14,10 | 11,20 | 13,90 | 13,10 | 12,40 | 13,00 | 13,20 | 11,40 |
| T Máxima | 33,30 | 32,70 | 43,80 | 37,90 | 37,40 | 35,90 | 41,80 | 36,60 | 43,80 |
| T Média | 20,17 | 19,67 | 20,84 | 20,78 | 21,17 | 20,72 | 21,65 | 21,09 | 18,24 |
| Amplitude | 19,10 | 18,60 | 32,60 | 24,00 | 24,30 | 23,50 | 28,80 | 23,40 | 32,40 |

Fonte: A Autora (2015)

Pode-se destacar, na tabela 19, que a temperatura média do ar foi 18,2°C. As médias das coberturas variaram entre 19,7°C (*Tradescantia zebrina*) e 21,6°C (telhado de fibrocimento). A maior temperatura registrada foi da espécie *Zoysia tenuifolia*, com a mesma temperatura máxima do ar, 43,8°C, registrando também menor temperatura e uma amplitude térmica de 32,6°, enquanto a espécie *Tradescantia zebrina* apresentou a menor amplitude térmica, com apenas 18,6°.

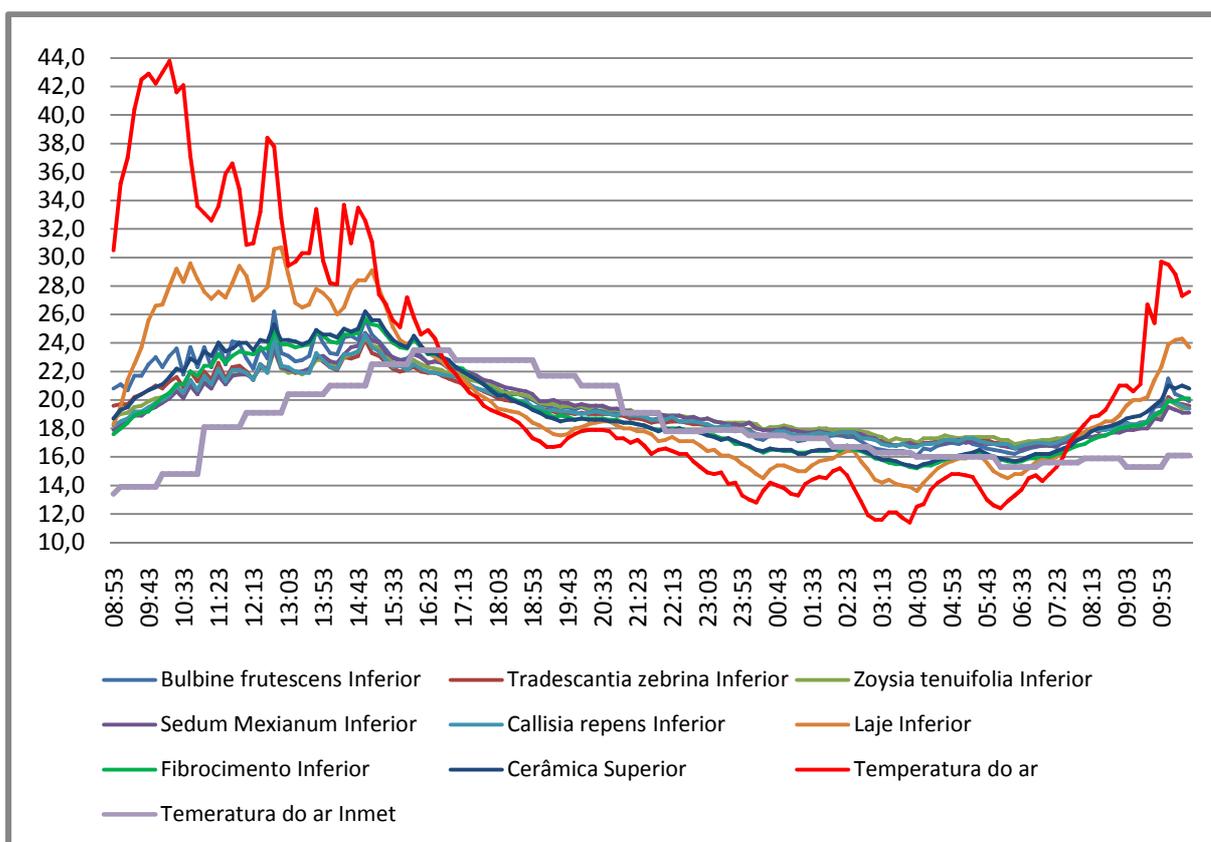


figura 128 - Gráfico de temperatura superficial inferior dia 09 e 10/04/2015
Fonte: A Autora (2015)

Quanto às temperaturas superficiais inferiores, a laje apresentou temperatura superior, em até 8°C, em relação à temperatura dos telhados verdes, ou seja, devido à reduzida capacidade térmica, a transmissão de calor é maior da superfície superior para a inferior. As menores temperaturas no período diurno foram das espécies *Callisia repens* e *Sedum mexicanum*. No período noturno a amplitude entre a laje e os telhados verdes foi de 3,5°C, nesse caso com a temperatura da laje

abaixo da temperatura dos telhados verdes. As temperaturas mais altas noturnas foram registradas pela espécie de grama coreana.

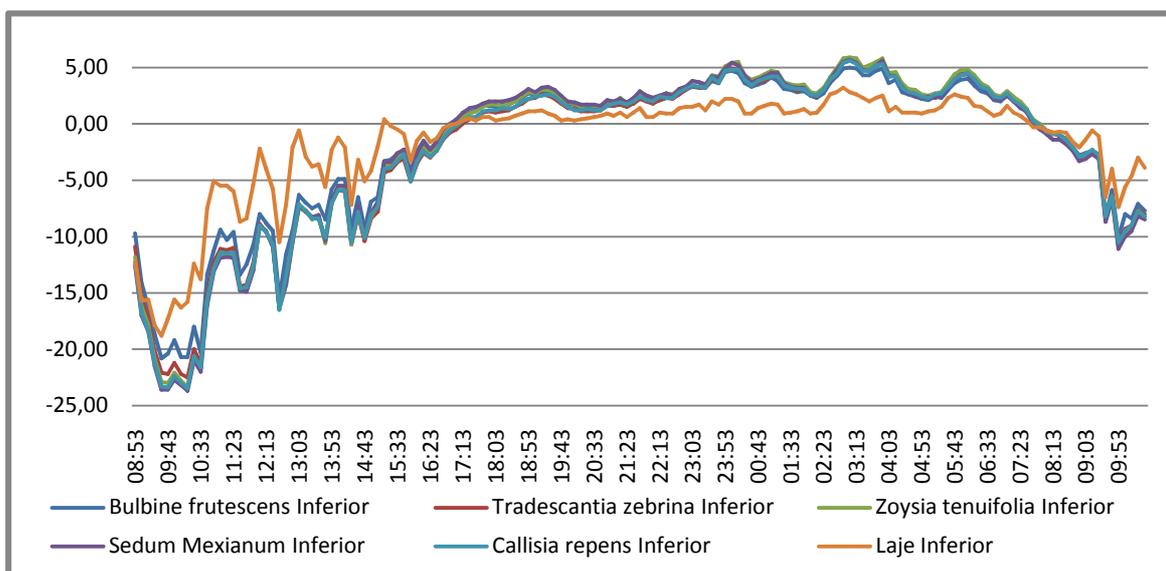


figura 129 - Gráfico da diferença entre a temperatura inferior e a temperatura do ar ($\Delta t = \text{tempSup} - \text{TempAr}$) dos sistemas de telhado verde e laje 09 e 10/04/2015
Fonte: A autora (2015)

A variação de temperatura entre os sistemas de telhado verde (figura 129) foram pequenas e apresentaram temperatura inferior à temperatura do ar ao longo do dia em até 24°C, enquanto a laje, nesse mesmo período, apresentou atenuação de 18°C.

No período noturno, a diferença dos telhados verdes foi de até 5,5°C, mas com aumento da temperatura em relação à temperatura do ar, enquanto a laje apresentou um acréscimo de aproximadamente 3°C.

tabela 20 - Comparação das amplitudes térmicas e dos valores máximos, médios e mínimos, temperaturas superficiais inferiores - 09 e 10/04/2015

| | <i>Bulbine frutescens</i> Inferior | <i>Tradescantia zebrina</i> Inferior | <i>Zoysia tenuifolia</i> Inferior | <i>Sedum mexicanum</i> Inferior | <i>Callisia repens</i> Inferior | Laje Superior | Fibrocimento Superior | Cerâmica Superior | Temperatura do ar |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| T Mínima | 16,10 | 16,70 | 16,90 | 16,60 | 16,60 | 13,60 | 15,20 | 15,30 | 11,40 |
| T Máxima | 26,20 | 24,20 | 24,40 | 24,70 | 24,60 | 30,70 | 25,70 | 26,20 | 43,80 |
| T Média | 19,76 | 19,38 | 19,54 | 19,45 | 19,34 | 20,11 | 19,21 | 19,48 | 21,69 |
| Amplitude | 10,10 | 7,50 | 7,50 | 8,10 | 8,00 | 17,10 | 10,50 | 10,90 | 32,40 |

Fonte: A autora (2015)

Na análise da amplitude térmica das temperaturas inferiores (tabela 20), pode-se perceber que as espécies *Tradescantia zebrina* e *Zoysia tenuifolia* apresentaram a mesma amplitude (7,5°C), seguida da espécie *Callisia repens* (8°C) e *Sedum mexicanum* (8,1°C). A maior amplitude registrada entre os telhados verdes foi da espécie *Bulbine frutescens* (10,1°C). Os telhados convencionais apresentaram as maiores amplitudes: 17,2°C (laje), 10,9°C (telha cerâmica) e 10,5°C (telha de fibrocimento).

Esses dados dos 5 eventos distintos demonstram que, quanto à temperatura superficial inferior e superior no período diurno, as coberturas se portaram de forma similar. Os telhados convencionais apresentaram temperatura mais elevada que os telhados verdes; em períodos com radiação solar direta essa variação de temperatura superou os 20°C. No período noturno, os sistemas convencionais apresentaram temperatura inferior aos sistemas de telhado verde, demonstrando que esses possuem uma variação térmica ao longo do dia superior aos sistemas de telhado verde.

Dentre as espécies vegetais analisadas, a *Zoysia tenuifolia* apresentou as maiores temperaturas superiores e inferiores no período diurno, e a *Bulbine frutescens* as mais baixas. Já no período noturno, a espécie *Zoysia tenuifolia* apresentou as maiores temperaturas quanto ao sensor superior, mas as menores temperaturas quanto ao sensor inferior. Já a espécie *Bulbine frutescens* apresentou as maiores temperaturas quanto ao sensor inferior e menores quanto ao superior.

4.3 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA

As águas coletadas pelas coberturas podem ser destinadas para fins não potáveis, conforme prevê legislação específica. Em Curitiba, através da Lei 10.785/2003, foi criado o programa de conservação e uso racional da água nas edificações, que foi regulamentado através do decreto 293/2006, o qual estabelece critérios para o uso e conservação racional da água nas edificações. No decreto são descritos os parâmetros para dimensionamento das cisternas, conforme dimensionamento das unidades habitacionais ou comerciais e industriais, mas não se menciona padrão de qualidade mínima da água para fins não potáveis.

Desta forma, como o objetivo da presente pesquisa é verificar se a água da chuva, depois de escoar por um sistema de telhado verde, se enquadra nos

parâmetros adotados pelas legislações vigentes, foram seus dados comparados com a resolução do Conama n.º 357/2005 (BRASIL, 2005) e n.º 274/2000 (BRASIL, 2000) e a portaria MS n.º 518/2004 (BRASIL, 2004). Entretanto essas legislações não tratam especificamente de água da chuva, mas sim de outros corpos de água. Desta forma, ressalta-se a importância de parâmetros próprios para escoamento de água da chuva.

As variáveis analisadas foram escolhidas em função da bibliografia existente que destaca tais parâmetros como os principais pontos alterados pelo sistema de telhado verde.

A análise de fósforo e nitrogênio em coberturas verdes é importante para verificar a influência do substrato e sua adubação e fertilização na qualidade da água. A eutrofização da água é causada pelo excesso desses nutrientes (nitrogênio e fósforo), que podem contribuir para o aumento de algas e da biomassa. Esse aumento de biomassa pode acarretar na diminuição da oxigenação da água e, como consequência, na diminuição da sua qualidade. Por isso a importância do controle desses dois nutrientes nas águas.

Os adubos orgânicos (formados por matéria de origem animal e vegetal) e os adubos inorgânicos (obtidos através da extração mineral ou refino do petróleo) são ricos em fósforo e nitrogênio. Assim, o objetivo é verificar o quanto essa adubação influencia na qualidade da água.

Foram realizadas duas análises de laboratório nos meses de março e maio de 2015, com duas coletas diferentes de água. Essas coletas foram feitas no dia seguinte à precipitação.

Na primeira coleta, o módulo de número 02 (*Tradescantia zebrina*) soltou a sua conexão do sistema de drenagem, desta forma, esse foi o único módulo que não apresentou transbordo na coleta. Todos os demais módulos transbordaram, ou seja, excederam os 26,67mm de água coletada. Segundo o Inmet (2015), a precipitação no dia 05/03, a partir das 19 horas, até o dia 06/03, às 03 horas, foi de 45,20mm. A coleta da água foi realizada no dia 06/03/2015 no período da manhã.

A segunda coleta foi realizada no dia 04/05/2015, também no período da manhã, e a precipitação ocorreu no dia 04/05/2015 entre 1 hora e 6 horas da manhã. Segundo o Inmet (2015), a precipitação registrada foi de 33,60mm

A precipitação registrada *in loco* demonstrou o transbordo dos sistemas de laje, telha de fibrocimento e telha de cerâmica. Os módulos de telhado verde apresentaram o seguinte escoamento:

1. *Bulbine frutescens* - 11,33mm
2. *Tradescantia zebrina* - 18mm
3. *Zoysia tenuifolia* - 14,67mm
4. *Sedum mexicanum* - 12,67mm
5. *Callisia repens* - 17,33mm

Na tabela 21 destacam-se os dados levantados quanto à análise de água da chuva, comparando as duas coletas registradas e a legislação vigente.

tabela 21 - Análise dos diferentes parâmetros de qualidade da água entre os sistemas de cobertura e a legislação vigente (Dados: Apêndice G)

| | Parâmetro | pH | Sólidos Totais mg/l | Coloração uC ou Uh | Nitrogênio Total mg/l | Nitrogênio Amoniacal mg/l | Fósforo Total mg/l |
|----------------|------------------------------|---------|---------------------|--------------------|-----------------------|--|--------------------|
| Legislação | Resolução Conama 274/2000 | 6-9,5 | - | - | - | - | - |
| | Portaria N 9518/04 MS | 6-9,5 | Até 1.000 | Até 15 | - | - | - |
| | Resolução 357/05 - Classe 01 | 6,0-9,0 | Até 500 | Cor natural | Até 1,27 | Até 3,7mg/L N, para pH ≤ 7,5 Até 2,0 mg/L N, para 7,5 < pH ≤ 8,0 Até 1,0 mg/L N, para 8,0 < pH ≤ 8,5 | Até 0,02 |
| | Resolução 357/05 - Classe 02 | 6,0-9,0 | | Até 75 | | | Até 0,05 |
| | Resolução 357/05 - Classe 03 | 6,0-9,0 | Até 500 | Até 75 | - | Até 13,3 mg/L N, para pH ≤ 7,5 Até 5,6 mg/L N, para 7,5 < pH ≤ 8,0 Até 2,2 mg/L N, para 8,0 < pH ≤ 8,5 | Até 0,075 |
| Coleta 01 | <i>Bulbine frutescens</i> | 6,63 | 17 | 400* | 4,52* | - | 1,58* |
| | <i>Tradescantia zebrina</i> | 6,52 | 164 | 1000* | 4,93* | - | 1,22* |
| | <i>Zoysia tenuifolia</i> | 6,53 | 20 | 400* | 4,71* | - | 1,30* |
| | <i>Sedum mexicanum</i> | 5,66* | 29 | 875* | 4,44* | - | 1,66* |
| | <i>Callisia repens</i> | 5,91* | 32 | 500* | 3,67* | - | 0,79* |
| | Laje | 6,77 | 2 | 12,5 | 1,62* | - | 0,01 |
| | Telha Fibrocimento | 8,25 | - | 20 | 1,95* | - | 0,06 |
| Telha Cerâmica | 6,51 | 22 | 100* | - | - | 1,32* | |
| Coleta 02 | <i>Bulbine frutescens</i> | 6,75 | 17 | 400* | - | 0,18 | 1,37* |
| | <i>Tradescantia zebrina</i> | 6,93 | 51 | 500* | - | 0,06 | 0,46* |
| | <i>Zoysia tenuifolia</i> | 6,92 | 28 | 500* | - | 0,07 | 0,59* |
| | <i>Sedum mexicanum</i> | 6,39 | 25 | 700* | - | 0,15 | 0,89* |
| | <i>Callisia repens</i> | 6,19 | 36 | 500* | - | 0,07 | 0,24* |
| | Laje | 6,71 | 11 | 50 | - | 0,11 | 0,02 |
| | Telha Fibrocimento | 7,41 | 9 | 20 | - | 0,12 | 0,58* |
| Telha Cerâmica | 6,56 | 14 | 12,5 | - | 0,24 | 0,09* | |

- Não consta na legislação ou não foram realizados ensaios quanto a esse parâmetro

* Dados que apresentaram índice superior a máximo previsto na legislação

Fonte: A autora (2015)

O primeiro ensaio realizado foi do pH da água. Segundo Tamiosso *et al.* (2007), o pH da água da chuva, quando coletada diretamente, pode apresentar níveis inferiores a 5, caracterizando-o como ácido. Isso é consequência da presença de gases como o CO₂ e SO₂, que reagem com a água e formam gases ácidos. Na tabela 21 pode-se comparar os dados de pH registrado em cada um dos módulos.

Na coleta 01 apenas dois módulos apresentaram índice inferior a seis, os módulos *Callisia repens* e *Sedum mexicanum*, entretanto superior a 5,5; os demais apresentaram valores entre 6 e 7, valor aceitável pelas legislações vigentes. Na segunda coleta, todos módulos apresentaram valores entre 6 e 9, entretanto a *Callisia repens* e *Sedum mexicanum* apresentaram novamente a menor taxa de pH, mas superiores a seis.

O sistema que apresentou o maior pH foi a telha de fibrocimento. Segundo Tassiano (2007) "isso se deve ao fato de o material do telhado ser de amianto, que é composto por mais de 90% de cimento e menos de 10% de fibras de amianto crisotila cuja fórmula química é Mg₃Si₂O₅(OH)₄, responsável pelo acréscimo do pH".

Quanto aos sólidos totais presentes nas análises, todos os módulos apresentaram quantidades inferiores previstas pela legislação. Comparando os sistemas entre si, pode-se perceber que os telhados verdes apresentam maior quantidade de sólidos. Observando a figura 130 pode-se notar que, devido a sua coloração, essa quantidade de sólidos deve-se a parte do substrato e do sistema de drenagem (argila expandida) que se deslocam junto com a água e possuem coloração marrom. O módulo 02 (*Tradescantia Zebrina*) apresentou maior índice de sólidos totais presentes nas duas análises realizadas e a *Bulbine frutescens* a menor quantidade, podendo estar associada à matéria orgânica dessas espécies. A espécie do módulo 02 tem uma troca de folhas mais constantes, formando mais matéria orgânica no substrato; já o módulo 01 não possui essa troca regular de folhas, apresentando menor quantidade de matéria orgânica.



figura 130 - Membranas após filtragem dos sólidos totais presentes na água.
01-*Bulbine frutescens*, 02-*Tradescantia zebrina*, 03-*Zoysia tenuifolia*, 04-*Sedum mexicanum*,
05-*Callisia repens*, 06-laje, 07-telhado de fibrocimento, 08-telhado cerâmico - coleta 01.
Fonte: A autora (2015)

Quanto à análise de coloração, mesmo antes da análise em laboratório, pode-se perceber que os sistemas de telhado verde possuem coloração ferrosa intensa e que não passariam no padrão de qualidade da água. Os sistemas de cobertura convencionais, com exceção da telha cerâmica na primeira coleta, ficaram dentro dos padrões. Isso indica que o conjunto drenagem, planta e substrato influencia diretamente a coloração da água. Percebe-se ainda uma variação significativa entre as espécies vegetais que pode estar associada à quantidade de matéria orgânica, decorrente da decomposição das folhas, em cada um dos módulos (figura 131). A análise de laboratório demonstrou que a espécie *Sedum mexicanum* (garrafa 4, figura 131) apresentou a maior alteração de coloração entre as espécies analisadas, e a *Bulbine frutescens* (garrafa 1, figura 131) a menor alteração, entretanto cinco vezes superior ao valor máximo admitido nas legislações vigentes. Esse mesmo resultado reflete-se na figura 130.



figura 131 - Amostras de água coletadas dos módulos.
**01-*Bulbine frutescens*, 02-*Tradescantia zebrina*, 03-*Zoysia tenuifolia*, 04-*Sedum mexicanum*,
05-*Callisia repens*, 06-laje, 07-telhado de fibrocimento, 08-telhado cerâmico - coleta 02.**
Fonte: A autora (2015)

A análise realizada quanto à presença de fósforo e nitrogênio total nas amostras foi com o objetivo de verificar o aumento desses índices em função da adubação. Segundo Liu *et al.* (2012), esses índices podem aumentar significativamente com o uso de fertilizantes.

Esse aumento é comprovado na presente pesquisa. Os telhados verdes apresentam até o dobro da quantidade de nitrogênio que os telhados convencionais e mais de 3 vezes os valores permitidos pela norma.

O fósforo total apresentou índices até 21 vezes maior do que os índices previstos na legislação e a cobertura de telha cerâmica também apresentou índice superior a norma. Os sistemas de laje impermeabilizada e telha de fibrocimento apresentaram parâmetros dentro dos limites da norma.

Quanto ao nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$), a sua presença em grande quantidade está associada à presença de efluentes na água. Por se tratar de água da chuva, os índices de nitrogênio amoniacal foram baixos, sendo que o mais alto foi

da água de telhado cerâmico e da espécie bulbine e todos dentro dos índices da legislação vigente.

Comparando os resultados obtidos com a bibliografia presente, os dados apresentados ficaram dentro da faixa do estudo de Moran *et al.* (2005) que foi de: 0,8 a 6,8 mg/l de nitrogênio e 0,6 a 1,5mg/l de fósforo, segundo Berndtsson (2010).

5 CONCLUSÃO

A análise da influência das espécies vegetais no desempenho dos telhados verdes demonstrou que existe uma variação significativa entre as espécies quanto às variáveis analisadas: capacidade de retenção de água, desempenho térmico e qualidade da água escoada.

Quanto ao desenvolvimento das espécies, pode-se concluir que é fundamental, para o clima de Curitiba, espécies que não sofram "queima" ou perda total das folhas em períodos com geada, mas que sejam resistentes ao estresse hídrico, ou seja, suportem períodos de estiagem e períodos com grande volume de precipitação.

A espécie *Arachis repens* (grama amendoim) não apresentou essa característica de rebrotamento após o evento registrado de geada, não sendo uma espécie recomendada para a cidade de Curitiba ou regiões onde geadas são possíveis durante o período de inverno.

Quanto ao desenvolvimento das espécies, pode-se concluir que a *Tradescantia zebrina* apresentou a melhor adaptação às condições impostas, com o fechamento mais denso do solo, seguido da *Zoysia tenuifolia*. A espécie *Callisia repens* (mais adaptada à condição de sombra), apresentou redução da área foliar quando imposta à incidência solar intensa, entretanto sobreviveu a todas as estações climáticas. A espécie *Sedum mexicanum* apresentou um desenvolvimento inicial muito positivo, entretanto, no período de verão, perdeu boa parte das mudas, podendo o fato estar associado à tipologia da planta. Por ser uma suculenta com fotossíntese do tipo CAM, ela não necessita de muita água. Como os meses de verão apresentam índices de precipitação alta, a água em excesso por ter apodrecido as raízes, causando a morte de muitas mudas. Recomenda-se, dessa forma, utilizar substratos mais porosos com areia, argila expandida e vermiculita em maior quantidade na sua composição, para que o solo fique menos saturado e contribua para o desenvolvimento da espécie.

Quanto à resistência ao estresse hídrico, a bibliografia recomenda o uso de espécies que realizem fotossíntese do tipo CAM (*Sedum*, por exemplo), sobre espécies do tipo C_3 e C_4 , devido ao seu consumo de água menor (até 100 gramas por grama de CO_2), enquanto as espécies do tipo C_3 consomem até 500 gramas por grama de CO_2 e do tipo C_4 300 gramas por grama de CO_2 . Entretanto, o que se

observou no experimento em questão foi que, devido aos índices pluviométricos altos registrados em Curitiba, essa característica não foi decisiva no desenvolvimento da espécie.

Analisando os resultados obtidos quanto à retenção de água da chuva, podemos concluir que a espécie *Bulbine frutescens* apresentou o maior índice de retenção, com aproximadamente 60%, seguido da espécie *Sedum mexicanum*. As demais espécies apresentaram índices com pouca variação entre eles, mas próximos a 50%

A retenção maior das espécies suculentas (*Bulbine frutescens* e *Sedum mexicanum*), pode estar associada a característica de armazenamento de água em suas folhas e raízes e ao fechamento do solo pelas folhas que, no caso dessas duas espécies, foi o menor fechamento entre as espécies analisadas, permitindo uma maior evaporação da água diretamente pelo substrato, ou seja, uma redução de umidade do mesmo.

As espécies *Tradescantia zebrina* e *Callisia repens* apresentaram o fechamento do solo mais uniforme e também a menor retenção de água de chuva. Isso pode ser explicado pelo fato de perderem menos água para o ambiente, mantendo seu substrato úmido por um período maior, sendo a saturação desse mais rápida após a precipitação, efeito que pode ainda estar associado à espécie *Zoysia tenuifolia*.

Conclui-se, assim, que os telhados verdes têm capacidade de reter uma quantidade expressiva de água em seu sistema (conjunto: substrato e planta) e que devido as características morfológicas de cada espécie existe variação de retenção entre as mesmas.

Quanto à análise térmica, pode-se concluir que as espécies vegetais influenciam no desempenho térmico das coberturas. Isso pode estar associado a alguns efeitos observados.

O efeito da evapotranspiração, que corresponde a evaporação da água no solo e da umidade da vegetação, além da transpiração da espécie vegetal. Esse efeito acontece em todas as espécies vegetais, ajudando a reduzir a temperatura de todos os telhados verdes, podendo esse fato ser observado quando comparado com os sistemas tradicionais de cobertura.

A radiação solar sobre espécies vegetais com menor densidade aproximam a temperatura dessas à temperatura da laje exposta à incidência solar. Esse efeito

pode ser percebido na espécie *Zoysia tenuifolia*, que apresentou os valores mais altos e mais próximos aos valores da laje, com picos de temperatura até 10°C acima dos outros sistemas de telhado verde.

As folhas escuras podem absorver mais calor, apresentando também temperaturas mais elevadas na superfície superior. Essa característica pode ser observada nas espécies de coloração arroxeadas, como a *Tradescantia zebrina* e *Callisia repens*.

Na espécie *Bulbine*, que, devido à sua composição morfológica, apresenta a maior altura entre as espécies analisadas, foram observados dois efeitos: o primeiro é quanto ao sombreamento do substrato, que ajuda a reduzir a temperatura superficial; e, o segundo, é o efeito de frear o vento, fazendo com que a temperatura se afastasse da temperatura do ar. Essa espécie apresentou a menor temperatura superficial superior entre as espécies analisadas.

No período noturno pode-se destacar dois efeitos que ocorrem quanto à temperatura: o primeiro deles é a troca de radiação (acumulada ao longo do dia) com o espaço/ar nas espécies com plantas menos densas. Esse efeito faz com que a temperatura superficial aproxime-se da temperatura observada na laje ou a temperatura do ar e é evidente na espécie *Zoysia tenuifolia*, que apresentou as menores temperaturas superficiais superiores durante a noite, em alguns casos até 4,5°C em relação a espécie *Bulbine frutescens* (evento 5). Ainda, o efeito do vento sobre o sistema que, dependendo da morfologia da espécie, pode aumentar ou diminuir a temperatura da superfície em relação a temperatura do ar.

Com relação aos resultados apresentados, pode-se destacar que a espécie *Zoysia tenuifolia* apresentou a maior temperatura superficial superior durante o dia, seguida das espécies *Callisia repens*, *Sedum mexicanum*. A espécie *Bulbine frutescens* foi a que apresentou as menores temperaturas entre os sistemas analisados. A espécie *Tradescantia Zebrina* variou com temperaturas altas e baixas dependendo do evento analisado, podendo estar associado à incidência solar (figura 132).

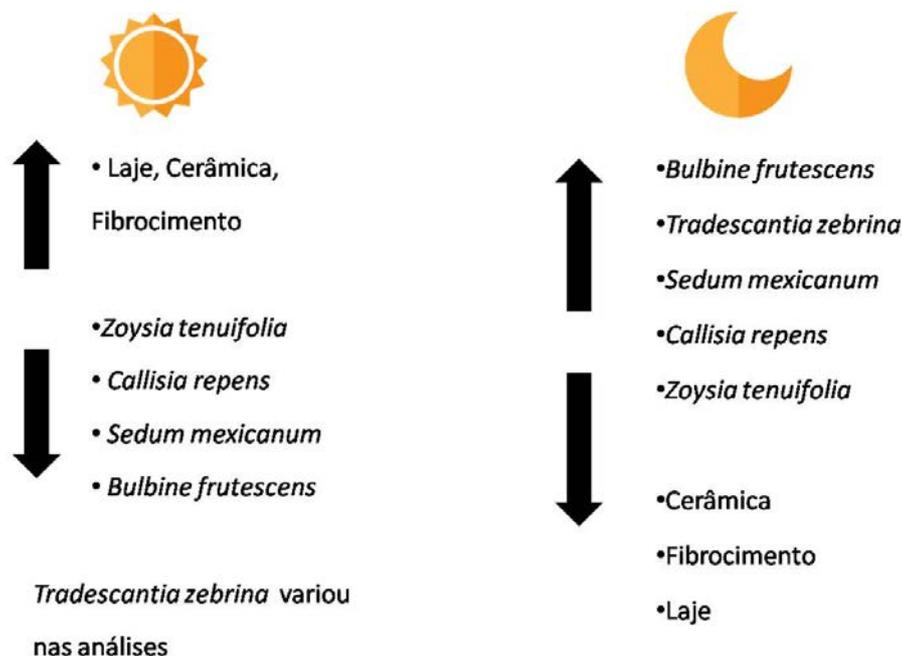


figura 132 - Hierarquia entre os sistemas de telhados quanto a temperatura superficial superior
 Fonte: A autora (2015)

No período noturno, a espécie *Bulbine frutescens* apresentou as temperaturas superficiais superiores mais altas registradas, seguida da espécie *Tradescantia Zebrina* e *Sedum mexicanum*. Já as espécies *Callisia repens* e *Zoysia tenuifolia* apresentaram as temperaturas noturnas mais baixas, próximas à temperatura da laje impermeabilizada.

Quanto a análise de temperatura superficial inferior dos eventos registrados, a variação entre as espécies vegetais é menos significativa que as temperaturas superiores, variando no máximo 2°C no período diurno. As espécies *Bulbine frutescens* e *Zoysia tenuifolia* apresentaram as temperaturas mais elevadas na maioria dos eventos analisados, enquanto a *Callisia repens* e o *Sedum mexicanum* e a *Tradescantia Zebrina* apresentaram as menores temperaturas registradas. Entretanto não se pode criar uma hierarquia entre as espécies vegetais, pois não foi observado um padrão nos eventos analisados, assim como no período noturno, não concluindo qual das espécies apresentou maior ou menor redução de temperatura em relação à temperatura do ar.

Comparando os sistemas de telhado verde com os sistemas convencionais de cobertura quanto as temperaturas inferiores diurnas, os telhados verdes apresentaram uma redução de até 10°C na temperatura em relação à laje, já no

período noturno apresentaram temperatura superior aos telhados convencionais, em média 2°C.

Pode-se concluir que os telhados verdes proporcionam estabilidade na temperatura durante o dia e a noite. Esse resultado pode estar associado a capacidade e resistência térmica dos telhados verdes, a ação de sombreamento na cobertura e o efeito da evapotranspiração, que faz com que o calor seja dissipado de forma mais lenta.

Essa pesquisa corrobora ainda com os resultados alcançados por Vecchia (2005) e Wong *et al.* (2003) quanto à estabilidade de temperatura que os sistemas de telhado verde proporcionam e a redução dos picos de temperatura.

Desta forma, pode-se concluir que as espécies vegetais influenciam o desempenho dos telhados verdes e apresentam variação significativa quanto aos telhados convencionais. Entretanto, quando analisadas as espécies vegetais, não foi possível criar um padrão de comportamento. Desta forma, a escolha da espécie vegetal é pouco significativa para o desempenho térmico de uma cobertura.

Analisando os resultados obtidos quanto à qualidade da água escoada pelos telhados verdes, pode-se concluir que existe uma variação entre as espécies vegetais, relacionada principalmente a matéria orgânica presente em cada um dos sistemas devido à decomposição das folhas. Entretanto, de forma geral, os sistemas se enquadraram igualmente nas legislações analisadas. Os índices de nitrogênio total, fósforo total e coloração não se adequaram a resolução Conama nº. 357/2005 e a portaria MS nº. 518/2004, isso por causa do excesso de nutrientes presentes no substrato que, no processo de escoamento, são transferidos para a água. Já quanto a coloração, o tom ferroso pode estar associado não somente ao substrato, mas ao sistema de drenagem, sendo recomendável um teste com outro sistema de drenagem para comparar com os resultados obtidos.

Vale ressaltar que nenhuma legislação trata especificamente de água pluvial escoada por coberturas. A comparação foi realizada com legislação de corpo de água. Desta forma, o uso da água da chuva para fins não potáveis não precisa atender aos padrões adotados na presente pesquisa, tendo sido utilizados apenas como dado referencial.

Para um novo experimento, recomendam-se algumas adequações do método para melhores resultados.

Para análise de retenção de água da chuva recomenda-se rever o dimensionamento dos galões de armazenamento de água, com capacidade mais adequada aos índices de precipitação diária para evitar o transbordo, conforme registrado em algumas medições.

Garantir um melhor isolamento do sensor inferior e a cobertura do sensor superior para reduzir a influência do meio, como ventos, reflexão da radiação no chão, entre outros. A mesa de testes pode ser elaborada com módulos independentes para evitar a influência de um sobre o outro.

O sensor de temperatura do ar deve ficar em uma condição de espaço aberto, sem incidência solar direta, com o objetivo de simular da melhor forma a temperatura real do ar no ambiente analisado.

A análise comparativa pode incluir um módulo apenas com o substrato para auxiliar a isolar a variável espécie vegetal e avaliar o desempenho térmico, capacidade de retenção e qualidade da água.

5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- a) Analisar outras espécies vegetais e sua adaptação ao clima da cidade de Curitiba;
- b) Avaliar, em protótipos simulando edificações, a variação de conforto térmico que as espécies vegetais proporcionam;
- c) Analisar todos os parâmetros de qualidade de água para sistemas de telhados verdes constantes nas legislações vigentes;
- d) Verificar o desempenho térmico e de qualidade da água através da variação da espessura e composição de substrato;
- e) Avaliar o desempenho dos telhados verdes na variável de temperatura superficial durante o inverno, com temperaturas do ar inferiores aos 10°C;
- f) Estudar sistemas de substrato que reduzam a coloração ferrosa intensa da água.
- g) Estudar sistemas de telhados verdes produtivos para a instalação como hortas urbanas.

REFERÊNCIAS

ANDRADE Nixon C. de, RORIZ, Maurício; Comportamento Térmico de Cobertura Verde Utilizando a Grama Brachiaria Humidicola na Cidade de São Carlos, SP. **Conforto no ambiente e na cidade**. Volume 1 número 4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Impermeabilização - Seleção e projeto. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9574** - Execução de impermeabilização. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9575**: Impermeabilização - Seleção e projeto. Rio de Janeiro, 2003.

BALDESSAR, Silvia M. N. **Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. **Ecological Engineering**, 351-360, 2010.

BIANCHINI, Fabricio; HEWAGE, Kasun. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. **Building and Environment**, Canadá, V 48 Pg 57 a 65. Ago, 2011.

Brasil. **Portaria MS nº 518, de 25 de março de 2004**. Estabelece as responsabilidades por parte de quem produz a água, a quem cabe o exercício do controle de qualidade da água e das autoridades sanitárias, a quem cabe a missão de “vigilância da qualidade da água” para consumo humano. Brasília, DF, 2004.

Brasil. **Resolução CONAMA nº 274, de 29 de novembro de 2000**. Revoga os artigos 26 a 34 da Resolução no 20/86. Publicada no DOU no 18, de 25 de janeiro de 2001, Seção 1, p.70-71.

Brasil. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, p. 58-63.

BREUNING, J. **The Economics of Green Roofs from the Perspective of the Commercial Client: A Cost-Benefit Analysis of Extensive Green Roofs**. Disponível em Green Roof Technology: <http://www.greenrooftechology.com/resources>. Acesso em 03 de agosto de 2014.

BREUNING, J., E YANDERS, A. C. **Introduction to the FLL Guidelines for the Planning**. Disponível em Green Roof Technology: <http://www.greenrooftechology.com/resources>. Acesso em 03 de agosto de 2014.

CANTOR, Steven L. **Green Roofs in Sustainable Landscape Design**. W.W. Norton & Company, New York – London, 2008.

CORBELLA, Oscar; YANNAS, Simos. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos – conforto ambiental**. Rio de Janeiro: ed: Revan, 2003.

CUNHA, A. P., E MENDIONDO, E. M. **Experimento hidrológico para aproveitamento de águas de chuva usando coberturas verdes leves (CVL)**. Disponível em Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo: <http://www1.eesc.usp.br/shs/downloads/technotes/emm/Ara-FAPESP-2004-Relat-final.pdf>. Acesso em 15 de abril de 2014.

FARRELL, C.; MITCHELL, R.E.; SZOTA, C.; RAYNER, J.P; WILLIAMS, G. Green roofs for hot and dry climates: Interacting effects of plant water use, succulence and substrate. **Building and Environment**. 2012, 49, 270-276.

GETTER, Kristin L.; ROWE, Bradley, D.; ROBERTSON, Philip G.; CREGG, Bert M.; ANDRESEN, Jeffrey D. Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs. **Environmental. Science. Technological**. 2009, 43, 7564–7570.

GIL, A. C. **Como elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª Ed. São Paulo: Editora Atlas S.A, 2002.

Global Wood. Disponível em Site da Global Wood:
<http://www.globalwood.com.br/produto>. Acesso em 15 de maio de 2014.

GREEN ROOF THECNOLOGY. Disponível em Green Roof Technology:
<http://www.greenrooftechnology.com/resources>. Acesso em 20 de novembro de 2012.

HENRY, A.; E FRASCARIA-LACOSTE, N. The green roof dilemma e Discussion of Francis and Lorimer (2011). **Journal of Environmental Management** , 91-92, 2012.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010.** Disponível em:
<<http://censo2010.ibge.gov.br/resultados>> Acesso em 10 de abril de 2012.

ICEL. Disponível em: <http://www.icel-manaus.com.br/>. Acesso em 15 de outubro de 2013

INMET - Instituto Nacional De Meteorologia. Normais Climatológicas 1961 a 1990. Disponível em:
<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em 03 de março 2015.

INMET - Instituto Nacional De Meteorologia. Dados Históricos. Disponível em:
<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em 15 de abril 2015.

JIM, C. Y. Passive warming of indoor space induced by tropical green roof in winter. **Energy** , 272-282, 2014.

KÖHLER, M.; SCHMIDT, M.; GRIMME, F. W.; LAAR, M.; PAIVA, V. L.; TAVARES, S. Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. **Environmental and Management** , 382 - 391, 2002.

KOSAREO, Lisa; RIES, Robert. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. **Building and Environmental**. Pg 2606 – 2613. 2007.

LIU, T. C.; SHYU, G. S.; FANG, W. T.; LIU, S. Y.; CHENG, B. Y. Drought tolerance and thermal effect measurements for plants suitable for extensive green roof planting in humid subtropical climates. **Energy and Buildings** , 180-188, 2012.

LORENZI, H. **Plantas para Jardim no Brasil: Herbáceas, arbustivas e trepadeiras**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2013.

MACHADO, María V.; BRITTO, Celina; NEILA, Javier. El cálculo de la conductividad térmica equivalente en la cubierta ecológica. **Revista on-line de ANTAC**, v.3, n.3, jul./set. 2003. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3495/1896>> Acesso em: 25 ago. 2012.

MINKE, G. **Techos verdes** - Planificación, ejecución, consejos prácticos. Uruguay: Editora Fin del Siglo, 2005.

MOODY, Seth S.; SAILOR, David J. Development and application of a building energy performance metric for green roof systems. **Energy and Buildings** 60 (2013) 262–269. 2013.

MOREIRA, Daniel A.; **O Método Fenomenológico da pesquisa**. São Paulo. Pioneira Thomson Learning, 2004.

MULLER, A. P. **Coberturas verdes: comportamento de substrato para coberturas verdes extensivas em Curitiba - PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

NASCIMENTO, Wânia C. **Coberturas verdes no contexto da região metropolitana de Curitiba – Barreiras e potencialidades**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

NIACHOU, A.; PAPAKONSTANTINO, K.; SANTAMOURIS, M.; TSANGRASSOULIS, A.; E MIHALAKAKOU, G. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. **Energy and Buildings** , 719 - 729, 2001.

OLIVEIRA, A. R. **Nove anos sem Burle Marx**. 2003. Disponível em Vitruvius: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/04.037/675>. Acesso em 05 de 08 de 2014.

Organização das Nações Unidas – ONU. **Population Division**. Disponível em: <http://esa.un.org/unpd/wup/>. Acesso em 15 de abril de 2015.

PATRO, R. **Jardineiro.net**. disponível em Jardineiro.net: <http://www.jardineiro.net/plantas/grama-amendoim-arachis-repens.html>. Acesso em 10 de novembro de 2013.

ROAF, Sue; FUENTES, Manuel e THOMAS, Stephanie. **Ecohouse: A Casa Ambientalmente Sustentável**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

ROBSON, Colin, **Real World Research**. 3.ed. John Wiley & Sons, 2011.

SAADATIAN, O.; SOPIAN, K.; SALLEH, E.; LIM, C. H.; RIFFAT, S.; SAADATIAN, E., *et al.* A review of energy aspects of green roofs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , 155-168, 2013.

SAMPAIO, M. D.; ALVES, M. D.; CARVALHO, L. G.; SANCHES, L. **Uso de Sistema de Informação Geográfica para comparar a classificação climática de**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto , 8857-8864, 2011.

SAVI, A. C.; TAVARES, S. F. Telhados verdes: análise comparativa de custo e peso com sistemas tradicionais de cobertura, 2013, Brasília, **XII Encac e VII Elacac**. Brasília, 2013.

SHAFIGH, P.; GHAFARI, H.; MAHMUD, H. B.; JUMAAT, M. Z. A comparison study of the mechanical properties and drying shrinkage of oil palm shell and expanded clay lightweight aggregate concretes. **Materials & Design** , 320-327, 2014.

SHINZATO, Paulo. **O impacto das vegetações nos microclimas urbanos**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: USP. 2009

TAMIOSSO, C. F.; JOBIM, A. L.; MACIEL, A. V.; KEMERICH, P. D. Captação da água da chuva no laboratório de engenharia ambiental. **Disc. Scientia**. Sério: Ciências Naturais e Tecnológicas, S. Maria, v. 8, n. 1, p. 25-37, 2007.

TUCCI, Carlos E. M. **Inundações Urbanas**. Disponível em: <http://4ccr.pgr.mpf.mp.br/institucional/grupos-de-trabalho/encerrados/residuosdocumentos-diversos/outros_documentos_tecnicos/curso-gestao-do-territorio-e-manejo-integrado-das-aguas-urbanas/drenagem1.PDF>. Acesso em 17 de abril de 2015.

VECCHIA, Francisco. **Cobertura Verde Leve (CVL): Ensaio Experimental**. Encac, Enlacac. Maceió, out. 2005. Disponível em: <http://www.eesc.usp.br/shs/attachments/121_COBERTURA_VERDE_LEVE_ENSAIO_EXPERIMENTAL.pdf> Acesso em: 31 ago. 2012.

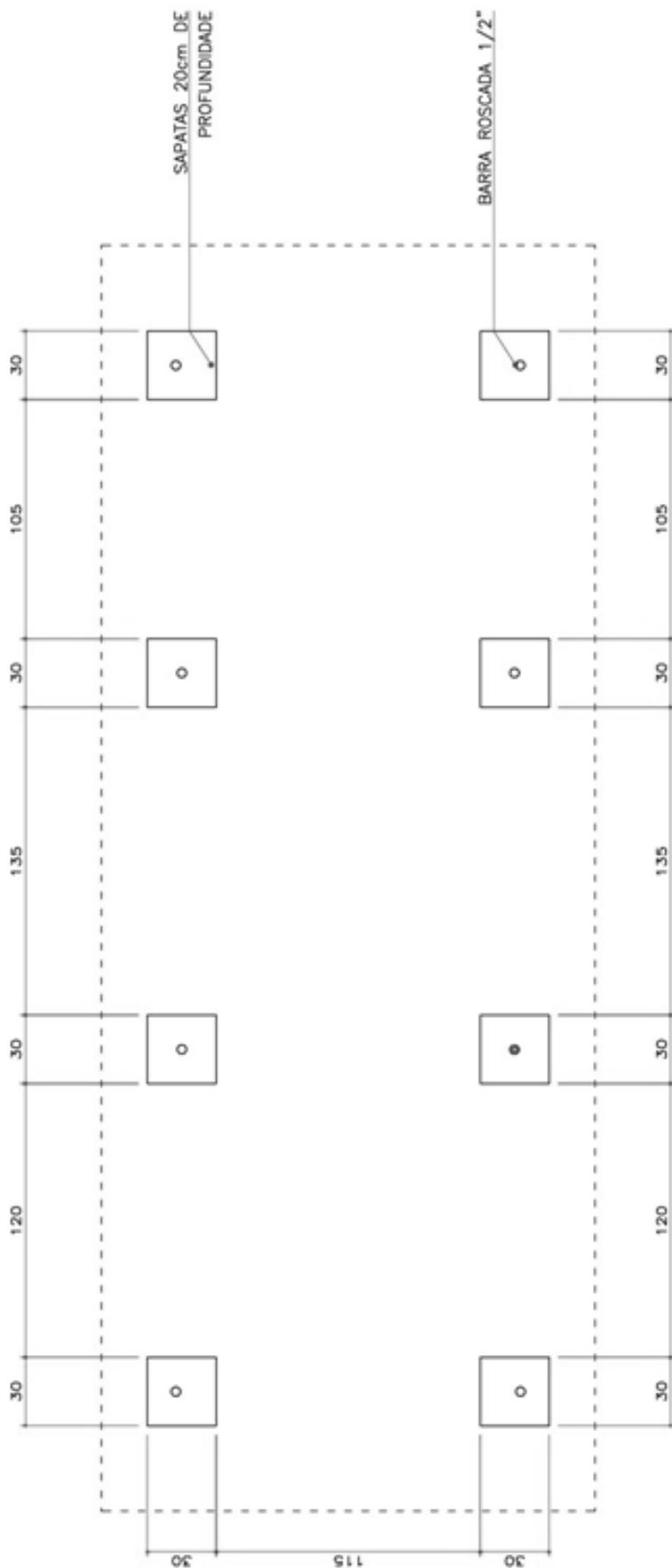
WONG, Nyuk H.; TAY, Su F.; WONG, Raymond; ONG, Chui L., SIA, Angelia. Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. **Building and Environment**. V 38 499 – 509 Singapore, Jul, 2002.

WONG, N. H.; CHEONG, D. K.; YAN, H.; SOH, J.; ONG, C. L.; SIA, A. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. **Energy and Buildings**, 353 - 364, 2003.

WONG, N., CHEN, Y., ONG, C., & SIA, A. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. **Building and Environment** , 261-270, 2003.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

APÊNDICE A



Planta baixa - Sapatas
Esc: 1/25



01/09

PROTÓTIPO TELhado VERDE

data: agosto/2013

Etapa: detalhamento

escala: 1:25

Referência: estrutura protótipo

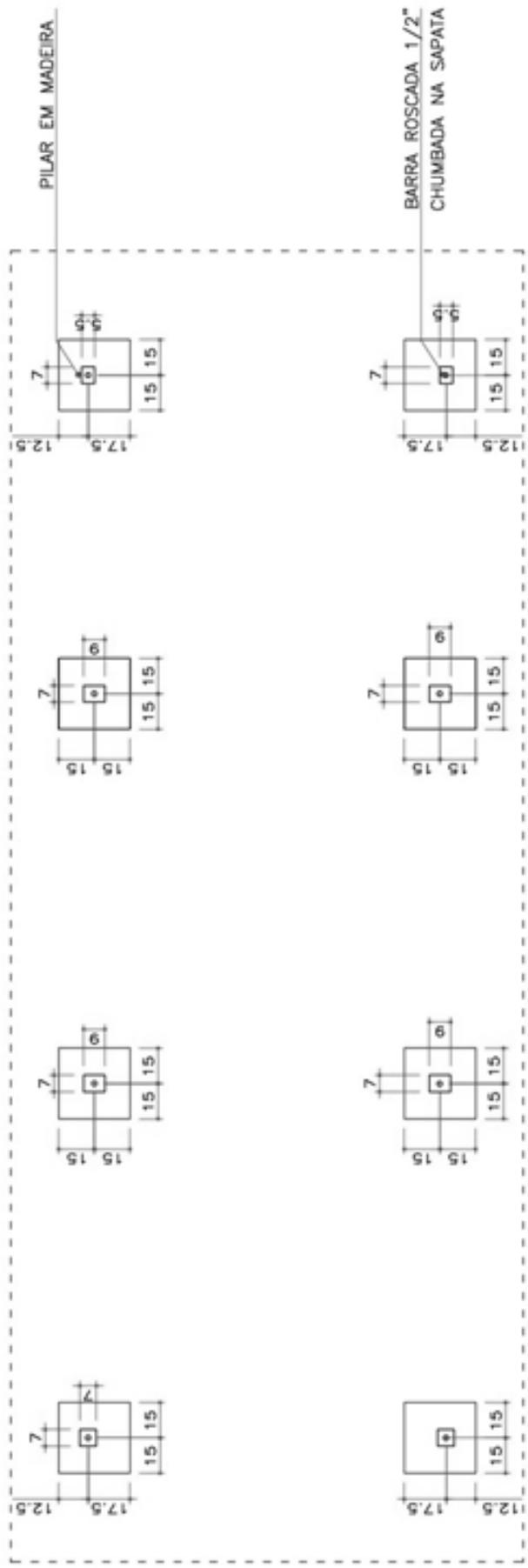
AUTORES:

Arq. Adriane Cordoni Savi

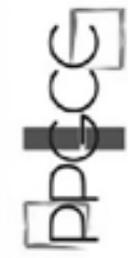
Arq. Ana Priscilla Romero Rodrigues Miller

Prof. Dr. Sergio Fernando Tavares





Planta baixa - Pilares e Barras
Esc.: 1/25

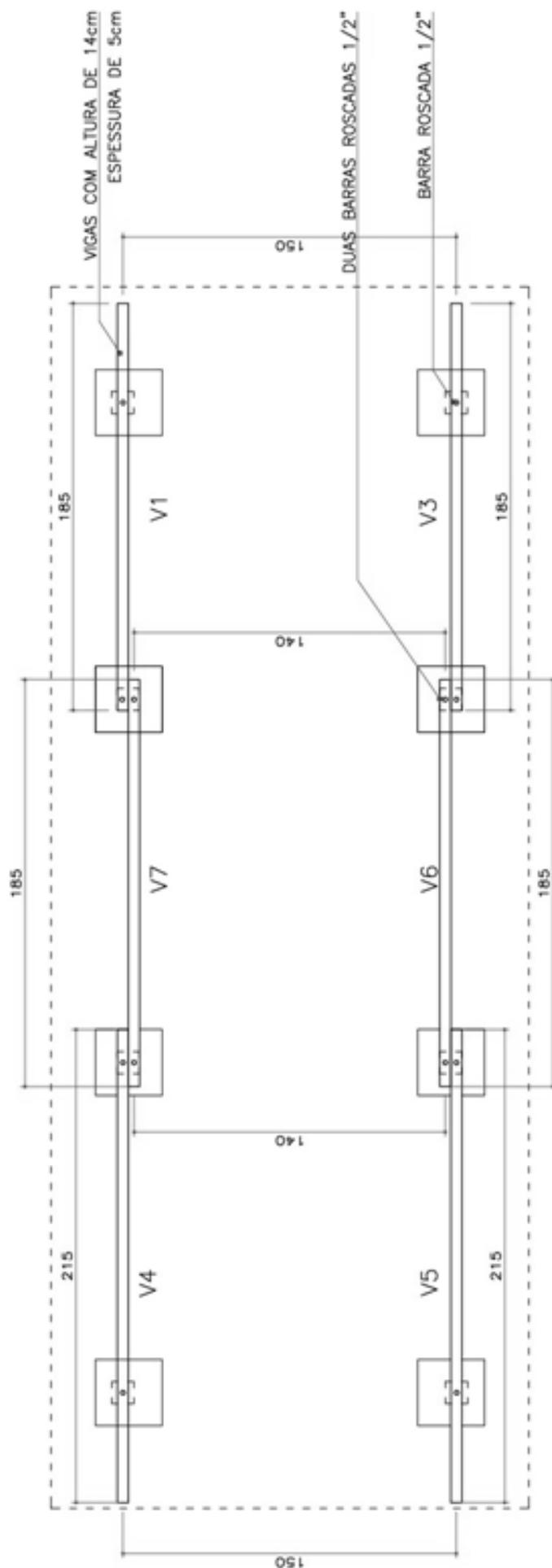


AUTORES:
Arq. Adriane Cordoni Savi
Arq. Ana Priscilla Romero Rodrigues Miller
Prof. Dr. Sergio Fernando Tavares

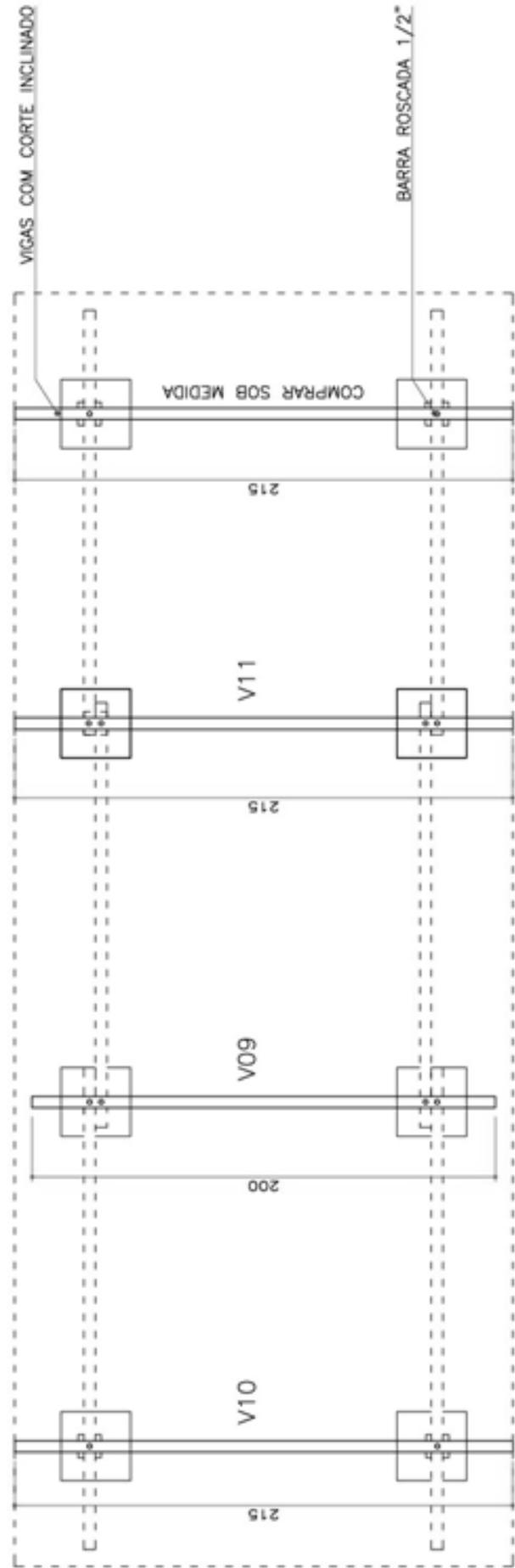
PROTÓTIPO TELHADO VERDE
Etapa: detalhamento
Referência: estrutura protótipo

02/09
data: agosto/2013
escala: 1:25

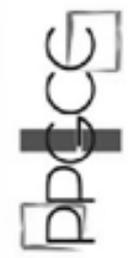




Planta baixa - Vigas longitudinais
Esc: 1/25



Planta baixa - Vigas Transversais
Esc: 1/25



AUTORES:

Arq. Adriane Cordoní Savi
Arq. Ana Priscilla Romero Rodrigues Miller
Prof. Dr. Sérgio Fernando Tavares

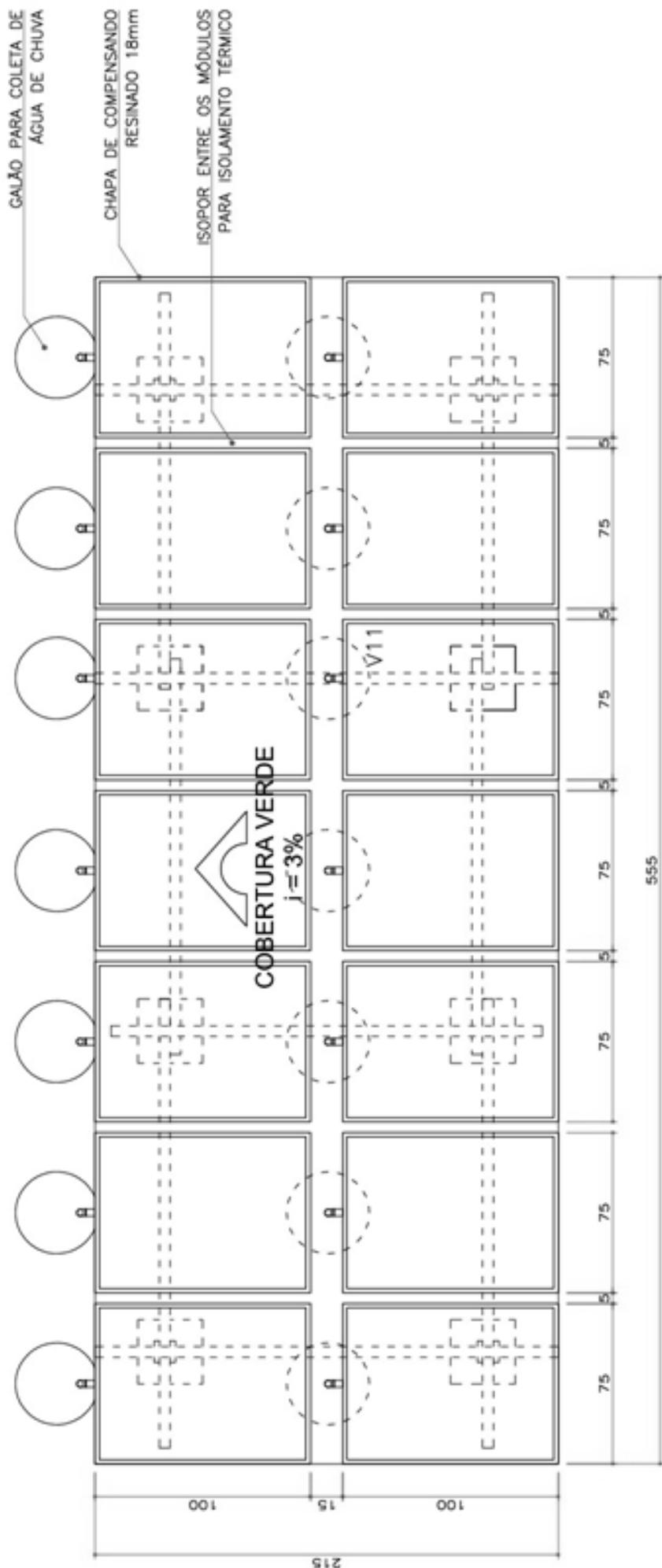
PROTÓTIPO TELHADO VERDE

04/09

data: agosto/2013
escala: 1:25

Etapa: detalhamento
Referência: estrutura protótipo





Planta baixa - Chapas de compensado
Esc: 1/20



AUTORES:
Arq. Adriane Cordoni Savi
Arq. Ana Priscilla Romero Rodrigues Miller
Prof. Dr. Sergio Fernando Tavares

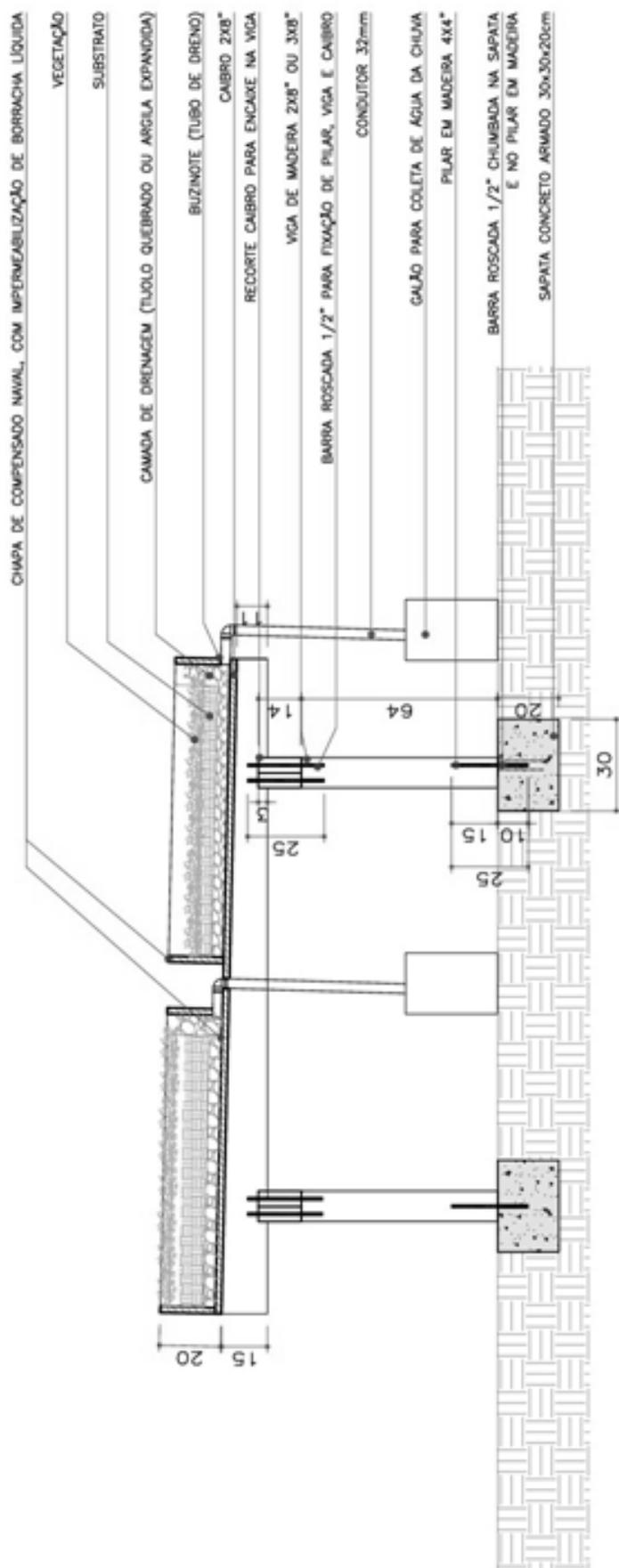
PROTÓTIPO TELHADO VERDE

05/09

Etapa: detalhamento
Referência: estrutura protótipo

data: agosto/2013
escala: 1:25





Corte
Esc.: 1/20

APÊNDICE B

tabela 22 - Modelo para anotação das informações coletadas nos protótipos em dia posterior a precipitação

Análise Pluvial:

Módulo 01: Telhado verde Planta Bulbine (*Bulbine frutescens*)
 Módulo 02: Telhado verde Planta Trapoeraba (*Tradescantia zebrina*)
 Módulo 03: Telhado verde Planta Grama (*Zoysia tenuifolia*)
 Módulo 04: Telhado verde Planta Sedum (*Sedum mexicanum*)
 Módulo 05: Telhado verde Planta Dinheiro em penca (*Callisia repens*)
 Módulo 06: Pluviômetro /Laje
 Módulo 07: Telha de fibrocimento
 Módulo 08: Telha cerâmica

Data:

Hora:

Data da última coleta:

Ensaio número:

Dados pluviométricos Simepar:

| | Mód.01 | Mód.02 | Mód.03 | Mód.04 | Mód.05 | Mód.06 | Mód.07 | Mód.08 |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ml | | | | | | | | |
| Conversão para mm/m ² | | | | | | | | |

Variáveis não controladas observadas:

Observações:

APÊNDICE C

tabela 23 - Tabela de coleta de dados de temperatura

Análise Temperatura:

Módulo 01: Telhado verde Planta Bulbine (*Bulbine frutescens*)

Módulo 02: Telhado verde Planta Trapoeraba (*Tradescantia zebrina*)

Módulo 03: Telhado verde Planta Grama (*Zoysia tenuifolia*)

Módulo 04: Telhado verde Planta Sedum (*Sedum mexicanum*)

Módulo 05: Telhado verde Planta Dinheiro em penca (*Callisia repens*)

Módulo 06: Laje

Módulo 07: Telha de fibrocimento

Módulo 08: Telha cerâmica

(Dados Coletados a partir do *Datalogger*, medições a cada 10 minutos durante 1 a 7 dias)

Data:

Data da última coleta:

Ensaio número:

| Temp. superficial superior | Mód.01 | Mód.02 | Mód.03 | Mód.04 | Mód.05 | Mód.06 | Mód.07 | Mód.08 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 8:00 | | | | | | | | |
| 8:15 | | | | | | | | |
| 8:30 | | | | | | | | |
| 8:45 | | | | | | | | |

| Temp. superficial inferior | Mód.01 | Mód.02 | Mód.03 | Mód.04 | Mód.05 | Mód.06 | Mód.07 | Mód.08 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 8:00 | | | | | | | | |
| 8:15 | | | | | | | | |
| 8:30 | | | | | | | | |
| 8:45 | | | | | | | | |

| | Temperatura do ar |
|------|-------------------|
| 8:00 | |
| 8:15 | |
| 8:30 | |
| 8:45 | |

APÊNDICE D

Dados de Precipitação segundo Inmet (2015) de junho de 2014 a janeiro de 2015.

| Precipitação (mm) | | | | | | | | |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Dia | jun/14 | jul/14 | ago/14 | set/14 | out/14 | nov/14 | dez/14 | jan/15 |
| 1 | 10 | 0 | 0 | 23,7 | 46,1 | 0 | 0 | 0,2 |
| 2 | 0 | 0 | 0,1 | 0 | 0 | 0,2 | 0 | 10,4 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 26,3 | 0,2 | 0 | 0 | 0,7 |
| 4 | 0,1 | 0 | 0 | 0,7 | 0,4 | 0 | 6,8 | 6,7 |
| 5 | 0,1 | 0 | 0 | 2,2 | 0,3 | 72,5 | 0 | 10,3 |
| 6 | 54,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,2 | 0 | 22,2 |
| 7 | 95,2 | 0,1 | 0 | 4,9 | 0 | 10,6 | 0 | 40,2 |
| 8 | 12,4 | 8,3 | 0 | 0,6 | 0 | 10,4 | 0 | 0,4 |
| 9 | 6,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9,4 | 0 | 4,5 |
| 10 | 0,3 | 2,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7,2 | 0 |
| 11 | 0 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,4 | 3 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19,8 |
| 13 | 0 | 0 | 30,3 | 0 | 0 | 0 | 4,2 | 0,5 |
| 14 | 0 | 0 | 1,2 | 0 | 0 | 10,4 | 0,4 | 10,8 |
| 15 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 4,3 | 0 | 0,4 |
| 16 | 0,6 | 0 | 16,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 7,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 9,4 | 18,5 | 0 | 0 | 41,8 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 1,6 | 0 | 0 | 44,7 | 0,1 | 0 | 2 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 3,4 | 24,9 | 8,7 | 3,5 | 8,4 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 13,2 | 0 | 43,9 | 0 | 11,6 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8,3 | 47,6 | 0,5 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 38 | 0,3 |
| 24 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0,1 | 0 | 7,8 | 0 |
| 25 | 0 | 9,4 | 0 | 28 | 0 | 0,2 | 0,7 | 0 |
| 26 | 0 | 0 | 7 | 13 | 2,4 | 24,3 | 18,4 | 1,4 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 1,5 | 0 | 0 | 3,1 | 0 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 1,5 | 0 | 0 | 0 | 12,2 |
| 29 | 19,5 | 0 | 0 | 4,8 | 0 | 0 | 1,6 | 4 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 7,9 | 0 | 0 | 7,6 | 9,8 |
| 31 | | 0 | 0 | | 0 | | 6,3 | 2,2 |

APÊNDICE E

Dados de laboratório quanto a qualidade da água.

Coleta de março de 2015:

SÓLIDOS TOTAIS

| | peso inicial película (g) | peso final película + sólidos (g) | Sólidos em 100ml (g) | Sólidos em 1000 ml (g) | mg/l |
|-----------|------------------------------|---|-------------------------|------------------------------|------|
| Módulo 01 | 0,0781 | 0,0798 | 0,0017 | 0,017 | 17 |
| Módulo 02 | 0,0781 | 0,0945 | 0,0164 | 0,164 | 164 |
| Módulo 03 | 0,0807 | 0,0827 | 0,0020 | 0,02 | 20 |
| Módulo 04 | 0,0794 | 0,0823 | 0,0029 | 0,029 | 29 |
| Módulo 05 | 0,0784 | 0,0816 | 0,0032 | 0,032 | 32 |
| Módulo 06 | 0,0793 | 0,0795 | 0,0002 | 0,002 | 2 |
| Módulo 07 | 0,0785 | 0,0781 | -0,0004 | -0,004 | -4 |
| Módulo 08 | 0,0787 | 0,0809 | 0,0022 | 0,022 | 22 |

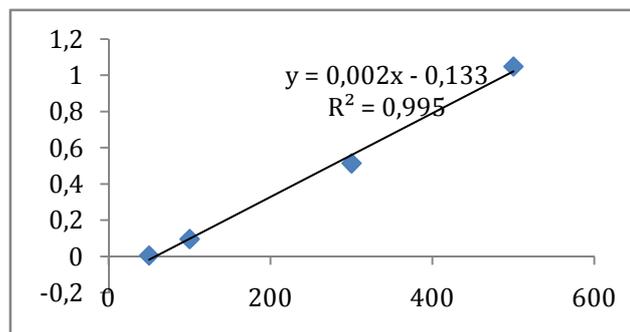
COLORAÇÃO

| | Diluição | | Unidade de cor |
|-----------|----------|----|----------------|
| MODULO 01 | 1:20 | 20 | 400 |
| MODULO 02 | 1:50 | 50 | 1000 |
| MODULO 03 | 1:20 | 20 | 400 |
| MODULO 04 | 1:50 | 50 | 875 |
| MODULO 05 | 1:20 | 20 | 500 |
| MODULO 06 | 1:1 | 1 | 12,5 |
| MODULO 07 | 1:1 | 1 | 20 |
| MODULO 08 | 1:10 | 10 | 100 |

Análise Nitrogênio total - março de 2015 (coleta 01)

| Curva Nitrato | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|-------------|
| Curva | padrao | | | absorbância |
| 0 | 0,0017 | 0 | 0,0026 | 0,0022 |
| 50 | 0,0056 | 0,0048 | 0,0050 | 0,0051 |
| 100 | 0,0962 | 0,0959 | 0,0946 | 0,0956 |
| 300 | 0,5162 | 0,5088 | 0,5155 | 0,5135 |
| 500 | 1,0408 | 1,0366 | 1,0653 | 1,0476 |
| Valores Amostras | | | | |
| módulo 01 | 1,0073 | 1,0239 | 1,0443 | 1,0252 |
| módulo 02 | 1,1216 | 1,1187 | 1,1201 | 1,1201 |
| módulo 03 | 1,0831 | 1,0779 | 1,0502 | 1,0704 |
| módulo 04 | 1,0116 | 1,0073 | 1,0029 | 1,0073 |
| módulo 05 | 0,8358 | 0,8308 | 0,8236 | 0,8301 |
| módulo 06 | 0,3741 | 0,3573 | 0,348 | 0,3598 |
| módulo 07 | 0,4464 | 0,4276 | 0,429 | 0,4343 |
| módulo 08 | - | - | - | |

| CURVA NITRATO | |
|---------------|-------------|
| Concentração | Absorbância |
| | |
| 50 | 0,0051 |
| 100 | 0,0956 |
| 300 | 0,5135 |
| 500 | 1,0476 |

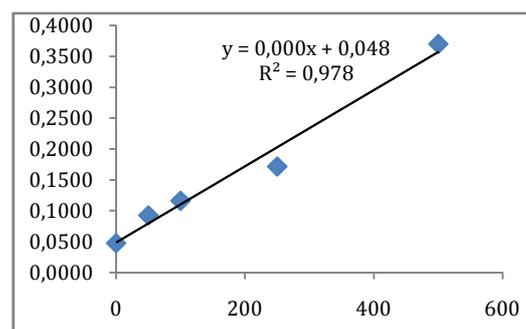


| Amostras | Absorbância (média) | Concentração ($\mu\text{g/L}$) | Concentração (mg/L) |
|----------|---------------------|----------------------------------|---------------------|
| 1 | 10,25 | 4515 | 4,52 |
| 2 | 11,20 | 4928 | 4,93 |
| 3 | 10,70 | 4712 | 4,71 |
| 4 | 10,07 | 4437 | 4,44 |
| 5 | 8,30 | 3667 | 3,67 |
| 6 | 3,60 | 1622 | 1,62 |
| 7 | 4,34 | 1946 | 1,95 |
| 8 | | | |

Análise Fósforo total - março de 2015 (coleta 01)

| Valores Curva de Fósforo | | | | |
|---------------------------------|------------|------------|--|--------|
| | amostra 01 | amostra 02 | | média |
| 0 | 0,0321 | 0,0095 | | 0,0095 |
| 50 | 0,0178 | 0,0249 | | 0,0214 |
| 100 | 0,0193 | 0,0215 | | 0,0204 |
| 250 | 0,0300 | 0,0387 | | 0,0344 |
| 500 | 0,0725 | 0,0754 | | 0,0740 |
| Valores Amostras | | | | |
| modulo 01 | 0,4972 | 0,5018 | | 0,4995 |
| modulo 02 | 0,3855 | 0,3973 | | 0,3914 |
| modulo 03 | 0,4208 | 0,4099 | | 0,4154 |
| modulo 04 | 0,5151 | 0,5273 | | 0,5212 |
| modulo 05 | 0,2583 | 0,2653 | | 0,2618 |
| modulo 06 | 0,0338 | 0,019 | | 0,0264 |
| modulo 07 | 0,0364 | 0,0507 | | 0,0436 |
| modulo 08 | 0,7373 | 0,1036 | | 0,4205 |

| CURVA FÓSFORO | | |
|----------------------|------------------|-------------|
| Concentração | Absorbância (x5) | Absorbância |
| 0 | 0,0475 | 0,0095 |
| 50 | 0,0925 | 0,0185 |
| 100 | 0,1160 | 0,0232 |
| 250 | 0,1715 | 0,0343 |
| 500 | 0,3700 | 0,0740 |



| Amostras | Absorbância (x2) | Absorbância (média) | Concentração (µg/L) | Concentração (mg/L) |
|----------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 0,9990 | 0,4995 | 1584 | 1,58 |
| 2 | 0,7828 | 0,3914 | 1224 | 1,22 |
| 3 | 0,8307 | 0,4154 | 1304 | 1,30 |
| 4 | 1,0424 | 0,5212 | 1657 | 1,66 |
| 5 | 0,5236 | 0,2618 | 792 | 0,79 |
| 6 | 0,0528 | 0,0264 | 7 | 0,01 |
| 7 | 0,0871 | 0,0436 | 64 | 0,06 |
| 8 | 0,8409 | 0,4205 | 1321 | 1,32 |

SÓLIDOS TOTAIS

| | peso inicial película (g) | peso final película + sólidos (g) | Sólidos em 100ml (g) | Sólidos em 1000 ml (g) | mg/l |
|-----------|---------------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------------|------|
| Módulo 01 | 0,0784 | 0,0801 | 0,0017 | 0,017 | 17 |
| Módulo 02 | 0,0774 | 0,0825 | 0,0051 | 0,051 | 51 |
| Módulo 03 | 0,0759 | 0,0787 | 0,0028 | 0,028 | 28 |
| Módulo 04 | 0,0761 | 0,0786 | 0,0025 | 0,025 | 25 |
| Módulo 05 | 0,0781 | 0,0817 | 0,0036 | 0,036 | 36 |
| Módulo 06 | 0,0763 | 0,0774 | 0,0011 | 0,011 | 11 |
| Módulo 07 | 0,0772 | 0,0781 | 0,0009 | 0,009 | 9 |
| Módulo 08 | 0,0764 | 0,0778 | 0,0014 | 0,014 | 14 |

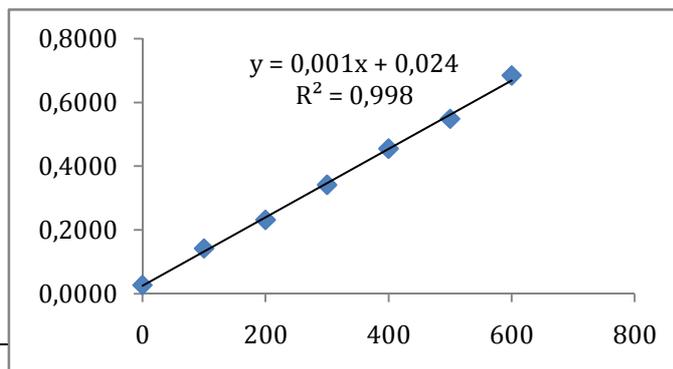
COLORAÇÃO

| | Diluição | | Unidade de cor |
|-----------|----------|-------|----------------|
| MODULO 01 | 1:20 | 20,00 | 400 |
| MODULO 02 | 1:20 | 25,00 | 500 |
| MODULO 03 | 1:20 | 25,00 | 500 |
| MODULO 04 | 1:40 | 17,50 | 700 |
| MODULO 05 | 1:20 | 25,00 | 500 |
| MODULO 06 | 1:10 | 5,00 | 50 |
| MODULO 07 | 1:1 | 20,00 | 20 |
| MODULO 08 | 1:1 | 12,50 | 12,5 |

Análise Nitrogênio Amoniacal - maio de 2015 (coleta 01)

| Curva Nitrogênio amoniacal | | | | |
|----------------------------|--------|--------|--------|-------------|
| Curva | padrao | | | absorbância |
| 0 | 0,0344 | 0,0222 | 0,0243 | 0,0270 |
| 100 | 0,1548 | 0,1324 | 0,1384 | 0,1419 |
| 200 | 0,2135 | 0,241 | 0,2393 | 0,2313 |
| 300 | 0,3326 | 0,355 | 0,3357 | 0,3411 |
| 400 | 0,4641 | 0,4695 | 0,4297 | 0,4544 |
| 500 | 0,5187 | 0,5857 | 0,5398 | 0,5481 |
| 600 | 0,6412 | 0,7054 | 0,705 | 0,6839 |
| Valores Amostras | | | | |
| módulo 01 | 0,218 | 0,222 | 0,2435 | 0,2278 |
| módulo 02 | 0,0939 | 0,0985 | 0,095 | 0,0958 |
| módulo 03 | 0,1047 | 0,1053 | 0,1078 | 0,1059 |
| módulo 04 | 0,1901 | 0,1761 | 0,1915 | 0,1859 |
| módulo 05 | 0,1014 | 0,0913 | 0,1047 | 0,0991 |
| módulo 06 | 0,1471 | 0,1416 | 0,1393 | 0,1427 |
| módulo 07 | 0,1624 | 0,1698 | 0,1482 | 0,1601 |
| módulo 08 | 0,2899 | 0,2937 | 0,2712 | 0,2849 |

| CURVA NITROGÊNIO AMONICAL | |
|---------------------------|-------------|
| Concentração | Absorbância |
| 0 | 0,0270 |
| 100 | 0,1419 |
| 200 | 0,2313 |
| 300 | 0,3411 |
| 400 | 0,4544 |
| 500 | 0,5481 |
| 600 | 0,6839 |

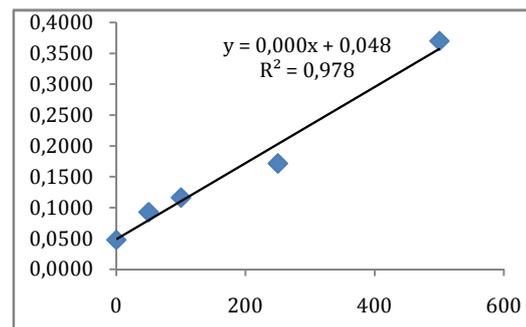


| Amostras | Absorbância (média) | Concentração (µg/L) | Concentração (mg/L) |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 0,2278 | 184,67 | 0,18 |
| 2 | 0,0958 | 64,64 | 0,06 |
| 3 | 0,1059 | 73,85 | 0,07 |
| 4 | 0,1859 | 146,55 | 0,15 |
| 5 | 0,0991 | 67,67 | 0,07 |
| 6 | 0,1427 | 107,24 | 0,11 |
| 7 | 0,1601 | 123,12 | 0,12 |
| 8 | 0,2849 | 236,58 | 0,24 |

Análise Fósforo total - março de 2015 (coleta 01)

| Valores Curva de Fósforo | | | | |
|---------------------------------|------------|------------|--|--------|
| | amostra 01 | amostra 02 | | média |
| 0 | 0,0321 | 0,0095 | | 0,0095 |
| 50 | 0,0178 | 0,0249 | | 0,0214 |
| 100 | 0,0193 | 0,0215 | | 0,0204 |
| 250 | 0,0300 | 0,0387 | | 0,0344 |
| 500 | 0,0725 | 0,0754 | | 0,0740 |
| Valores Amostras | | | | |
| modulo 01 | 0,4972 | 0,5018 | | 0,4995 |
| modulo 02 | 0,3855 | 0,3973 | | 0,3914 |
| modulo 03 | 0,4208 | 0,4099 | | 0,4154 |
| modulo 04 | 0,5151 | 0,5273 | | 0,5212 |
| modulo 05 | 0,2583 | 0,2653 | | 0,2618 |
| modulo 06 | 0,0338 | 0,019 | | 0,0264 |
| modulo 07 | 0,0364 | 0,0507 | | 0,0436 |
| modulo 08 | 0,7373 | 0,1036 | | 0,4205 |

| CURVA FÓSFORO | | |
|----------------------|------------------|-------------|
| Concentração | Absorbância (x5) | Absorbância |
| 0 | 0,0475 | 0,0095 |
| 50 | 0,0925 | 0,0185 |
| 100 | 0,1160 | 0,0232 |
| 250 | 0,1715 | 0,0343 |
| 500 | 0,3700 | 0,0740 |



| Amostras | Absorbância (x2) | Absorbância (média) | Concentração (µg/L) | Concentração (mg/L) |
|----------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 0,9990 | 0,4995 | 1584 | 1,58 |
| 2 | 0,7828 | 0,3914 | 1224 | 1,22 |
| 3 | 0,8307 | 0,4154 | 1304 | 1,30 |
| 4 | 1,0424 | 0,5212 | 1657 | 1,66 |
| 5 | 0,5236 | 0,2618 | 792 | 0,79 |
| 6 | 0,0528 | 0,0264 | 7 | 0,01 |
| 7 | 0,0871 | 0,0436 | 64 | 0,06 |
| 8 | 0,8409 | 0,4205 | 1321 | 1,32 |

ANEXO A

Procedimentos de laboratório adotados no Labeam (Laboratório de Engenharia Ambiental Francisco Borsari Neto) do DHS (Departamento de Hidráulica e Saneamento) da UFPR (Universidade Federal do Paraná):

POP 09 – SÉRIE DE NITROGÊNIO – NITROGÊNIO AMONIAICAL TOTAL ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$)

1. MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO

1.1. MÉTODO MODIFICADO DO FENATO / AZUL DE INDOFENOL

A presença de um composto de intensa coloração azul-esverdeado característica, azul de indofenol, é formada através da reação entre a concentração de N- NH_3 presente na amostra, hipoclorito de sódio e fenol em meio básico, tendo o nitroprussiato de sódio como catalisador da reação, conforme esquema abaixo:

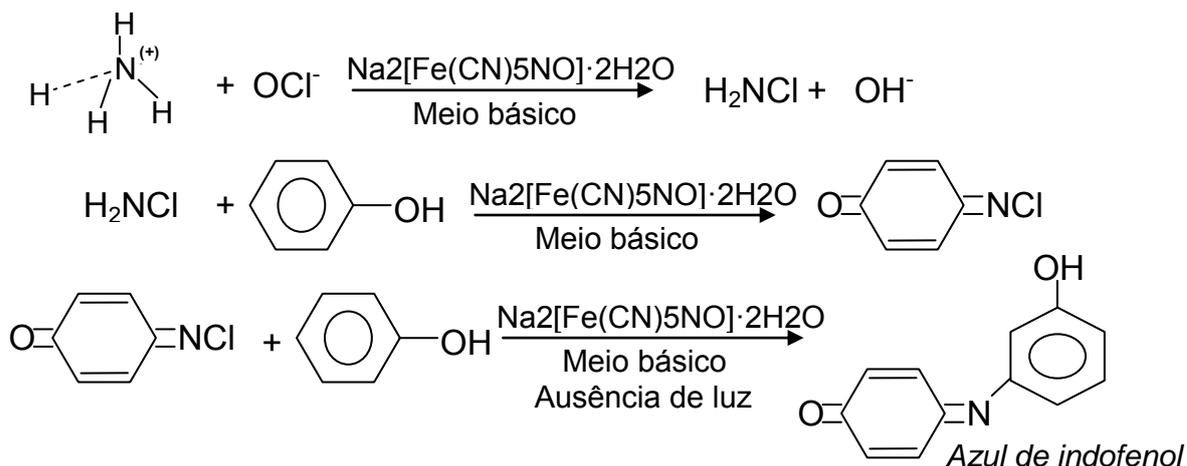


Figura 7. Esquema explicativo das etapas de reação de Berthelot (1859), utilizada como metodologia analítica na quantificação de N-Amoniacal em amostras de água e de efluentes líquidos.

1.2. EQUIPAMENTOS, VIDRARIAS E REAGENTES

Equipamentos e materiais

- Bomba de vácuo
- Membranas de acetato de celulose ($\varnothing 0,45\mu\text{m}$)
- Balança analítica (precisão $\pm 0,0001\text{g}$)
- Espectrofotômetro UV-VIS
- Micropipeta (100 - 1000 μl)

- Papel parafilm®

Vidrarias

- Balão volumétrico de 100ml
- Balão volumétrico de 500 ml
- Pipetas volumétricas e graduadas
- Cubeta de vidro
- Conjunto kitassato para filtração

Reagentes analíticos

- **Solução estoque padrão de NH_4Cl :** dissolver 0,3819g de cloreto de amônio (NH_4Cl p.a), previamente seco em estufa ($100^\circ\text{C}/2\text{h}$), em aproximadamente 80ml de água destilada. Aferir com água destilada para 100ml, em balão volumétrico.

* Armazenar em frasco âmbar e acondicionar em ambiente refrigerado (4°C).

* Estável por 1 mês após o preparo.

* $1\text{ml} = 1\text{mg N}$ ou $1\text{ml} = 1,22\text{ mg NH}_3$.

- **Solução intermediária padrão de N-NH_3 :** diluir 5ml da solução estoque padrão em água destilada. Aferir com água destilada para 50ml (diluição de 10x), em balão volumétrico.

* Concentração final de 100 mg N.L^{-1}

* Preparo deve ser realizado para uso imediato.

- **Solução de hipoclorito de sódio:** solução comercial 2,5%.

- Verificar reposição desta solução a cada 6 meses, devido à decomposição após abertura do frasco.

* Transfira a solução para um frasco âmbar para acondicionamento em ambiente refrigerado (4°C).

- **Solução reativa 1 (Hipoclorito alcalino):** adicionar 20ml de hipoclorito de sódio 2,5% em 80ml de água destilada e deionizada. Na sequência, adicionar 5g de NaOH p.a. Dissolver e aferir com água destilada para 100 ml, em balão volumétrico.

* Armazenar em frasco âmbar e acondicionar em ambiente refrigerado ($<4^\circ\text{C}$).

* Estável por 2 meses após o preparo.

- **Solução reativa 2 (Fenol + Nitroprussiato de sódio):** dissolver 10g de fenol (p.a) e 0,1g de nitroprussiato de sódio (p.a) em, aproximadamente, 80ml de água destilada. Dissolver e aferir com água destilada para 100ml, em balão volumétrico.

* Armazenar em frasco âmbar e acondicionar em ambiente refrigerado (4°C).

* Estável por 2 meses após o preparo.

* **ATENÇÃO:** durante o preparo, utilize luvas e óculos de proteção e sempre que for manusear o fenol (reagente ou solução para N-NH₃), trabalhar **SEMPRE** em capela com ventilação / exaustão; O fenol é altamente cancerígeno e todos os procedimentos de segurança devem ser adotados na hora do uso.

2. PROCEDIMENTO ANALÍTICO

2.1. CALIBRAÇÃO DO MÉTODO

A calibração do método é realizada através de curva de calibração padrão, descrita na seqüência:

1. Partindo-se da **solução intermediária padrão** preparar, em balões volumétricos de 50ml, a seguinte curva de calibração (volume final com água destilada):

| Concentração N-NH ₃ (µg.L ⁻¹) | Volume N-NH ₃ (ml) |
|--|-------------------------------|
| 0 (branco) | - |
| 200 | 0,1 |
| 400 | 0,2 |
| 800 | 0,4 |
| 1200 | 0,6 |
| 2000 | 1,0 |

*Para uma melhor confiabilidade e verificação da linearidade da curva de calibração, esta pode ser preparada em duplicata ou triplicata.

2. Posteriormente ao preparo das soluções padrões, conforme a tabela acima, retirar, com auxílio de uma pipeta volumétrica, uma alíquota de 2ml de cada padrão e reservar em outro frasco;

3. Juntamente aos padrões, realizar prova em branco utilizando alíquotas de 2ml de água destilada;

4. Adicionar nesta ordem: 1ml da solução reativa 1 seguido de 1ml da solução reativa 2;

5. Fechar o frasco com papel Parafilm® e misturar por inversão;
6. Aguardar 10 minutos para desenvolvimento e estabilização da cor;
7. Leitura em espectrofotômetro ($\lambda = 630\text{nm}$). Tempo máximo para leitura de 24h;
8. Equação da reta, obtida com a plotagem do gráfico: absorvância (eixo y) X concentração (eixo x);
9. Verificar coeficiente de linearidade: $R > 0,990$;
10. Realizar comparação com a curva de analítica apresentada na **Figura 8a**;

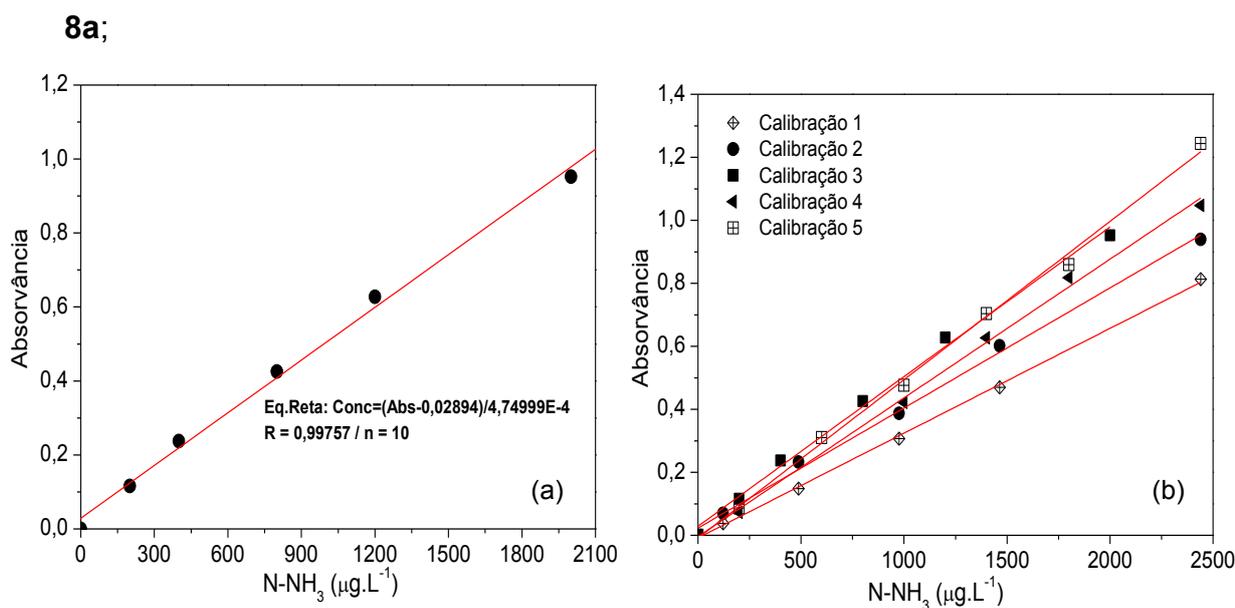


Figura 8. (a) Exemplo de curva analítica de NH_4Cl aplicada a calibração do método colorimétrico para determinação de N-Amoniacal (N-NH_3) em amostras de água e efluentes líquidos e (b) Exemplo comparativo de cinco calibrações preparadas em diferentes períodos (jul/09 – fev/10) para análise de N-NH_3 .

2.2. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE N-NH_3 / NH_4^+ EM AMOSTRAS

1. Homogeneizar bem a amostra presente no frasco de coleta;
2. Transferir 20ml de amostra para o sistema de filtragem de vácuo;
3. Filtrar em membrana de acetato de celulose $\varnothing 0,45\mu\text{m}$;
4. A partir da fração dissolvida, retirar alíquotas de 2ml (triplicata) e reservar em frascos secundários;
5. Juntamente as amostras, realizar prova em branco utilizando alíquotas de 2ml de água destilada;

6. Adicionar nesta ordem: 1ml da solução reativa 1 seguido de 1ml da solução reativa 2, para cada alíquota (amostra ou branco);
7. Fechar o frasco com papel Parafilm® e misturar por inversão;
8. Aguardar 10min para desenvolvimento e estabilização da cor;
9. Leitura em espectrofotômetro ($\lambda = 630\text{nm}$). Tempo máximo para leitura de 24h;

ATENÇÃO: o método do fenato para quantificação de N-NH_3 acaba por gerar um resíduo composto, principalmente, por fenol, devido à existência deste reagente nas etapas de reação do método. Assim, todo e qualquer material líquido gerado por este método devem ser armazenados em frascos próprios para o resíduo de fenol / N-NH_3 (FRASCOS DE VIDRO PARA DESCARTE).

2.3. CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO

Quantificação da concentração de N-NH_3 / NH_4^+ (mg.L^{-1} ou $\mu\text{g.L}^{-1}$) através da equação da reta, obtida na curva analítica (calibração).

2.4. LIMITE DE DETECÇÃO

O método para quantificação de N-NH_3 / NH_4^+ é aplicável para leitura na faixa de concentração entre 10 e 2000 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Para concentrações superiores, sugere-se a diluição da mesma e, posteriormente, quantificação através do fator de diluição $f_{\text{diluição}}$ utilizado.

3. DESCARTE DO RESÍDUO GERADO

O método proposto no presente manual para análise de nitrogênio amoniacal utiliza fenol nas etapas de quantificação da amostra. Dessa forma, o resíduo gerado deve ser, exclusivamente, armazenado em frascos de vidro (≥ 1 litro). Quando houver um acúmulo excessivo em laboratório deve-se solicitar na Prefeitura da Cidade Universitária um encaminhamento para transporte e destinação final no aterro industrial da Essencis.

3. REFERÊNCIAS

WEATHERBURN. **Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia.** Anal. Chem, Vol.8, pp. 130-132, 1962.

Adaptação de STANDARD METHODS, *method 4500-NH₃ F* (Apha, 1998)

POP 10 – SÉRIE DE NITROGÊNIO – NITROGÊNIO TOTAL (N_T)

1. MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO

1.1. MÉTODO DA DIGESTÃO POR PERSULFATO DE POTÁSSIO

Quantificação de N_T através de uma oxidação alcalina em autoclave (25min / 14kg.cm⁻¹) na faixa de temperatura entre 110 - 125°C, para conversão de todas as formas de nitrogênio presentes a N-NO₃⁻ e posterior redução pela coluna de Cd-Cu para detecção na forma de N-NO₂⁻, a exemplo do esquema abaixo:

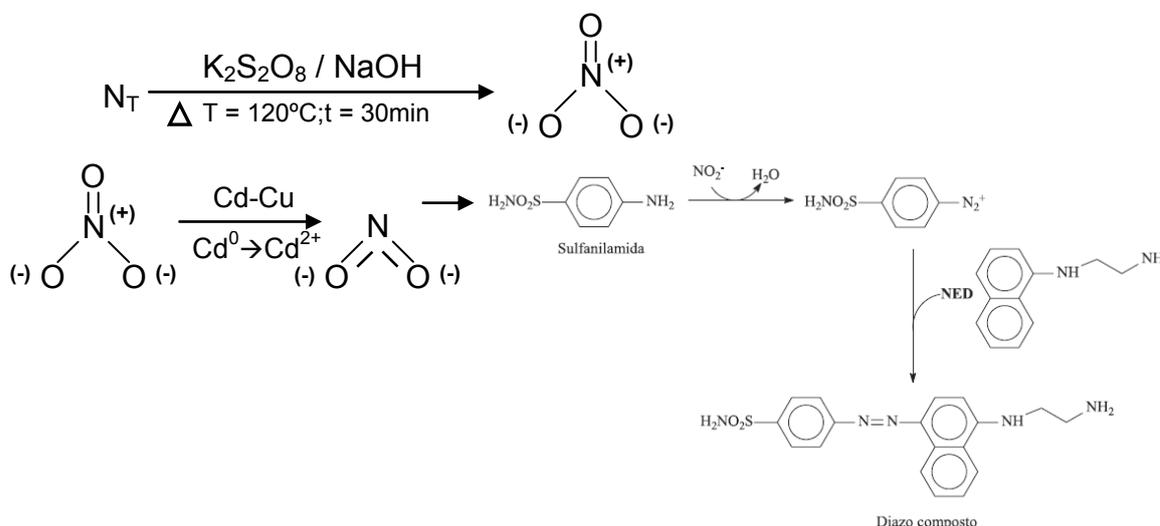


Figura 9. Esquema explicativo das etapas da oxidação por persulfato das formas de nitrogênio a N-Nitrato, redução de N-Nitrato para N-Nitrito através da coluna de Cd-Cu e reação de Griess (1879), utilizada como metodologia analítica na quantificação de N-Total em amostras de água e de efluentes líquidos.

1.2. EQUIPAMENTOS, VIDRARIAS E REAGENTES

Equipamentos

- Balança analítica (precisão ± 0,0001g)
- Autoclave vertical
- Espectrofotômetro UV-Vis

Vidrarias

- Frascos para digestão
- Balão volumétrico de 100ml
- Balão volumétrico de 500ml
- Tubos de plástico para centrifuga, tipo *Falcon* (15ml)
- Pipetas volumétricas e graduadas
- Cubeta de vidro

Reagentes analíticos

- **Solução digestora:** dissolver 2,01g de persulfato de potássio ($K_2S_2O_8$ p.a < 0,001% N), em aproximadamente 80ml de água destilada. Adicionar 0,300g de hidróxido de sódio (NaOH p.a) e dissolver novamente. Aferir com água destilada para 100ml, em balão volumétrico.

* *Preparo deve ser realizado para uso imediato.*

- **Solução tampão de borato:** dissolver 30,9g de ácido bórico (H_3BO_3 p.a) em, aproximadamente, 300ml em água destilada. Adicionar 4g de hidróxido de sódio (NaOH p.a) e dissolver novamente. Aferir com água destilada para 500 mL em balão volumétrico.

* *Estável por 1 ano (mínimo).*

- Solução de sulfato de cobre 2%: ver *POP-08, item 1* ($N-NO_3^-$).
- Solução estoque de NH_4Cl – EDTA: ver *POP-08, item 1* ($N-NO_3^-$).
- Solução diluída de NH_4Cl – EDTA: ver *POP-08, item 1* ($N-NO_3^-$).
- Solução reativa para $N-NO_2^-$: ver *POP-07, item 1* ($N-NO_2^-$).

2. PROCEDIMENTO ANALÍTICO

2.1. CALIBRAÇÃO DO MÉTODO

A calibração do método é mesma utilizada para a determinação do nitrato (ver *POP-08*).

2.2. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE N-TOTAL EM AMOSTRAS

1. Homogeneizar bem a amostra presente no frasco de coleta;
2. Transferir com o auxílio de uma pipeta volumétrica, 5ml da amostra para tubos de ensaio com rosca para uso na autoclave;
3. Adicionar ao volume de amostra, 2,5ml da solução digestora;
4. Fechar bem os tubos para digestão e misturar por inversão;
5. Manter na autoclave, por um período de 25min após atingir a temperatura de 120°C e pressão de 14 kg.cm⁻². Neste momento, mudar a chave seletora de máximo para médio e controlar a possibilidade de aumento no manômetro de controle. Neste caso, mudar a chave para mínimo;
6. Após o término da digestão e resfriamento da autoclave, retirar os tubos e aguardar que atinjam a temperatura ambiente;
7. Após esfriar, adicionar 1ml da solução tampão de borato e misturar por inversão;
8. Transferir o volume presente no tubo de ensaio para um balão volumétrico de 50ml;
9. Adicionar 10ml da solução de NH₄Cl-EDTA diluída;
10. Aferir o balão volumétrico com água destilada;
11. Passar a amostra pela coluna de Cd-Cu (ver etapa de ativação da coluna de Cd-Cu);
12. Descartar, aproximadamente, os primeiros 40ml;
13. Coletar, em um tubo de centrifuga aferido (15ml), os próximos 5ml e transferir para um frasco secundário;
14. Nesta alíquota de 5ml, adicionar 0,4ml da solução reativa para N-NO₂⁻;
15. Leitura em espectrofotômetro ($\lambda = 543\text{nm}$) entre 10min e tempo máximo de 2h;

O mesmo procedimento deve ser realizado para as réplicas da amostra e para outras amostras. Após a passagem da amostra, seguir o mesmo procedimento para realização das provas em branco, utilizando água destilada.

ATENÇÃO: seguindo este procedimento acima, descrito para N_T, você estará fazendo uma diluição de 10 vezes da amostra, ou seja, foram tomados 5ml iniciais da amostra, passado pela digestão e antes de passar pela coluna de Cd-Cu foi diluída para 50ml. Para este exemplo, o valor

obtido para a absorvância deve ser corrigido com um fator de diluição de 10 vezes, de modo a se obter o valor da concentração real.

2.3. CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO

Quantificação da concentração de N_T (mg.L^{-1} ou $\mu\text{g.L}^{-1}$) através da equação da reta, obtida na curva de calibração para $N\text{-NO}_3^-$.

2.4. LIMITE DE DETECÇÃO

O método para quantificação de N_T é aplicável para leitura de concentrações $< 2,9 \text{ mg.L}^{-1}$. Concentrações superiores ao limite podem ser obtidas através da diluição da amostra e, posteriormente, quantificação através do fator de diluição $f_{\text{diluição}}$.

ATENÇÃO: para este método, se a concentração de N_T for superior ao limite de detecção, a diluição da amostra deve ser realizada na etapa 2 deste procedimento. Ao adicionar os 5ml da amostra, uma diluição de 5x, por exemplo, pode ser preparada a partir de 1ml da amostra e 4ml de água destilada e, em seguida adição da solução digestora (etapa 3). Ainda, a diluição pode ser feita separadamente, em balão volumétrico, e posteriormente o volume de 5ml retirado e transferido para o tubo de digestão. Assim, se houver uma diluição prévia a etapa de digestão, esta deve ser acrescida a diluição de 10x, aplicada a este procedimento e descrita acima, ou seja, ambos os fatores de diluição são multiplicados para que a nova diluição seja obtida.

3. DESCARTE DO RESÍDUO GERADO

Idem procedimento apresentado para nitrito e nitrato.

3. REFERÊNCIA

Adaptação de STANDARD METHODS, *method 4500- N C* (Apha, 1998)

POP 05 – SÉRIE DE SÓLIDOS

1. MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO – GRAVIMÉTRICO

O método gravimétrico baseia-se na diferença de peso. Dessa forma, a determinação das várias formas de sólidos prende-se a diferença entre o peso seco e úmido, em relação ao volume de amostra utilizado no ensaio.

1.1. EQUIPAMENTOS, VIDRARIAS E REAGENTES

Equipamentos e materiais

- Bomba de Vácuo
- Balança analítica (precisão $\pm 0,0001\text{g}$)
- Dessecador
- Estufa ($105 \pm 5^\circ\text{C}$)
- Mufla ($550 \pm 5^\circ\text{C}$)
- Pinça simples metálica ou de madeira e espátula
- Porta Filtro
- Membrana de filtração de fibra de vidro

Vidrarias

- Proveta graduada (50ml e 100ml)
- Pipeta graduada e volumétrica
- Cápsula de porcelana de 50ml de capacidade
- Cápsula de porcelana de 100ml de capacidade
- Cadinho de porcelana de 50ml de capacidade
- Conjunto kitassato para filtração
- Cone Imhoff

Reagentes analíticos

Não é utilizada nenhuma solução, apenas a amostra.

1.2. SÓLIDOS TOTAIS (S_T)

1.2.1. PROCEDIMENTO ANALÍTICO (*Amostra*)

(a) Preparo da Cápsula (*NOTA: procedimento explicativo para 1 réplica*)

1. Ligar a mufla a $550 \pm 5^\circ\text{C}$ e a estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$;
2. Colocar uma cápsula limpa na mufla para aferição por 1h e seguir os passos abaixo na sequência:
 - a. Esfriar na estufa por 45min seguido de dessecador por 45min;
 - b. Pesar a cápsula e anotar o resultado em g (P0);

(b) Determinação de Sólidos Totais (S_T)

1. Transferir para a cápsula, uma alíquota homogênea de volume adequado de amostra, medido em proveta, e manter sob evaporação em banho-maria até atingir secura completa (MANUSEAR A CÁPSULA SEMPRE COM O AUXÍLIO DA PINÇA E NÃO DIRETAMENTE COM A MÃO);
2. Levar a cápsula com resíduo em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 45min;
3. Deixar a cápsula esfriar no dessecador por 45min;
4. Pesar a cápsula com resíduo e anotar o resultado em g (P1);
5. Expressar o resultado:

$$ST(\text{mg} / \text{L}) = \frac{(P1 - P0) * 1.000.000}{Vamostra(\text{mL})} \quad (6)$$

(c) Determinação de Sólidos Totais Fixos (S_{TF})

1. Após anotar o valor do peso P1, transferir a cápsula para mufla a $550 \pm 5^\circ\text{C}$ por 1 hora e seguir os passos abaixo na sequência;
2. Esfriar na estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 30min seguido de dessecador por 45min;
3. Pesar a cápsula e anotar o resultado em g (P2);
4. Expressar o resultado:

$$STF(\text{mg} / \text{L}) = \frac{(P2 - P0) * 1.000.000}{Vamostra(\text{mL})} \quad (7)$$

(d) Determinação de Sólidos Totais Voláteis (S_{TV})

1. É obtido através do cálculo da diferença entre os Sólidos totais e os Sólidos Totais Fixos;
2. Expressar o resultado:

$$STV(mg / L) = ST - STF \quad (8)$$

1.3. SÓLIDOS SUSPENSOS (S_{ST})

1.3.1. PROCEDIMENTO ANALÍTICO (*Amostra*)

(a) Preparo do Cadinho (*NOTA: procedimento explicativo para 1 réplica*)

1. Ligar a mufla a $550 \pm 5^{\circ}\text{C}$ e a estufa a $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$;
2. Colocar um cadinho limpo com a membrana de fibra de vidro na mufla para aferição por 1h;
3. Deixar o cadinho esfriar na estufa por 45min seguido de dessecador por 1h;
4. Pesar o cadinho e anotar o resultado em g (P_0);

(b) Determinação de Sólidos Suspensos Totais (S_{ST})

1. Transferir o cadinho contendo o papel filtro de fibra de vidro para um porta filtro adaptado ao kit kitassato para filtração (MANUSEAR A CÁPSULA SEMPRE COM O AUXÍLIO DA PINÇA E NÃO DIRETAMENTE COM A MÃO);
2. Filtrar um volume de amostra entre 50 e 200ml (*volumes utilizados rotineiramente*), com auxílio de uma proveta graduada, que favoreça a quantificação de SST na amostra em questão;
3. Retirar o cadinho contendo o papel filtro fibra de vidro e o resíduo sólido retido no mesmo do kit kitassato;
4. Levar o cadinho com resíduo, para estufa a $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 1h;
5. Em seguida, aguardar esfriar no dessecador por 30min;
6. Pesar o cadinho com resíduo e anotar o resultado em g (P_1);
7. Expressar o resultado:

$$SST(mg / L) = \frac{(P1 - P0) * 1.000.000}{Vamostra(mL)} \quad (9)$$

(c) Determinação de Sólidos Suspensos Fixos (S_{sf})

1. Após anotar o valor do peso P1, transferir o cadinho para mufla a 550 ± 5°C por 1h;
2. Deixar a cadinho esfriar na estufa a 105 ± 5°C por 30min seguido de dessecado por 45min;
3. Pesar a cadinho e anotar o resultado em g (P2);
4. Expressar o resultado:

$$SSF(mg / L) = \frac{(P2 - P0) * 1.000.000}{Vamostra(mL)} \quad (10)$$

(d) Determinação de Sólidos Suspensos Voláteis (S_{sv})

1. É obtido pela diferença entre os sólidos suspensos totais e os sólidos suspensos fixos;
2. Expressar o resultado:

$$SSV(mg / L) = SST - SSF \quad (11)$$

1.4. SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS (S_s)

1.4.1. PROCEDIMENTO ANALÍTICO (Amostra)

2. Homogeneizar vigorosamente a amostra;
3. Transferir a amostra para o cone de Imhoff até a marca de 1000ml;
4. Deixar em repouso por 45min;
5. Passar vagarosamente um bastão de vidro na parede interna do cone, ou gira-lo suavemente entre as mãos;
6. Deixar em repouso por mais 15min;
7. Determinar o volume, em ml, ocupado pelos sólidos sedimentáveis;
8. Anotar o valor observado;
9. Expressar o resultado em ml.L⁻¹ pela leitura direta no cone Imhoff;

2. REFERÊNCIAS

Adaptação de STANDARD METHODS, *method 2540 B* (Apha, 1998)

Adaptação de STANDARD METHODS, *method 2540 E* (Apha, 1998)

STANDARD METHODS, *method 2540 F* (Apha, 1998)

POP 13 – SÉRIE DE FÓSFORO – FÓSFORO TOTAL (P_T)

1. MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO

1.1. MÉTODO DA DIGESTÃO ALCALINA (K₂S₂O₈ / NaOH) & MÉTODO DO ÁCIDO ASCÓRBICO

Quantificação de P_T através de digestão alcalina utilizando persulfato de potássio em autoclave (125°C / 14kg.cm⁻¹ / 25min) para conversão de todas as formas de fósforo presentes para ortofosfato (PO₄³⁻) e posterior quantificação segundo o método do ácido ascórbico.

1.2. EQUIPAMENTOS, VIDRARIAS E REAGENTES

Equipamentos e materiais

- Bomba de vácuo e membranas de acetato de celulose (Ø 0,45µm)
- Balança analítica (precisão ± 0,0001g)
- Autoclave vertical
- Espectrofotômetro UV-Vis
- Micropipeta (100 - 1000µl)

Vidrarias

- Frascos para digestão (vidro)
- Balão volumétrico de 100ml, 250ml e 500ml
- Erlenmeyer
- Pipetas volumétricas e graduadas
- Cubeta de vidro

Reagentes analíticos

- **Solução digestora alcalina:** dissolver 2,01g de persulfato de potássio (K₂S₂O₈ p.a < 0,001% N), em aproximadamente 80ml de água destilada Adicionar 0,300g de hidróxido de sódio (NaOH p.a) e dissolver novamente. Aferir com água destilada para 100ml, em balão volumétrico.

* Preparo deve ser realizado para uso imediato.

- **Solução reativa combinada (Mix):** ver POP-12, item 1 (PO_4^{3-}).
- **Solução padrão para fosfato (50 mg.L⁻¹):** ver POP-12, item 1 (PO_4^{3-}).
- **Solução tampão de borato:** dissolver 30,9g de ácido bórico (H_3BO_3 p.a) em, aproximadamente, 300ml em água destilada. Adicionar 4g de hidróxido de sódio (NaOH p.a) e dissolver novamente. Aferir com água destilada para 500 mL em balão volumétrico.

* Estável por 1 ano (mínimo).

1. PROCEDIMENTO ANALÍTICO

1.1. CALIBRAÇÃO DO MÉTODO

A calibração do método é realizada através de curva de calibração padrão, descrita na seqüência:

1. A partir da **solução padrão (50 mg P.L⁻¹)** (ver POP-12, item 1) preparar, em balões volumétricos de 50ml a seguinte curva de calibração (volume final com água destilada):

| Concentração P- PO_4^{-3} ($\mu\text{g.L}^{-1}$) | Volume P- PO_4^{-3} (ml) |
|---|-----------------------------------|
| 0 (branco) | - |
| 100 | 0,1 |
| 300 | 0,3 |
| 500 | 0,5 |
| 900 | 0,9 |
| 1500 | 1,5 |

*Para uma melhor confiabilidade e verificação da linearidade da curva de calibração, esta pode ser preparada em duplicata ou triplicata.

2. A partir das soluções padrões preparadas, retirar com o auxílio de uma pipeta volumétrica, alíquotas de 5ml e transferir para os tubos de ensaio com rosca para uso em autoclave;

3. Juntamente aos padrões, realizar prova em branco utilizando alíquotas de 5ml de água destilada;

4. Adicionar a cada tubo, 2,5ml da solução digestora alcalina;

5. Fechar bem os tubos para digestão e misturar por inversão no mínimo duas vezes;

6. Manter na autoclave, por um período de 25min após atingir a temperatura de 120°C e pressão de 14 kg.cm⁻². Neste momento, mudar a chave seletora de máximo para médio e controlar a possibilidade de aumento no manômetro de controle. Neste caso, mudar a chave para mínimo;

7. Após o término da digestão e resfriamento da autoclave, retirar os tubos e aguardar que atinjam a temperatura ambiente;

8. Após esfriar, adicionar 1ml da solução tampão de borato e misturar por inversão.

9. Transferir a solução para um balão volumétrico de 25ml e aferir com água destilada;

10. Retirar uma alíquota de 10ml e reservar em outro frasco;

11. Adicionar a esta alíquota 2ml da solução reativa combinada (Mix).
Repetir o mesmo procedimento para os demais padrões e réplicas;

12. Fechar o frasco e misturar por inversão;

13. Aguardar 10min para o desenvolvimento e estabilidade da cor;

14. Leitura em espectrofotômetro ($\lambda = 880\text{nm}$). Tempo máximo para leitura de 45min;

15. Equação da reta obtida com a plotagem do gráfico: absorbância (eixo y) X concentração (eixo x);

16. Verificar coeficiente de linearidade: $R > 0,990$;

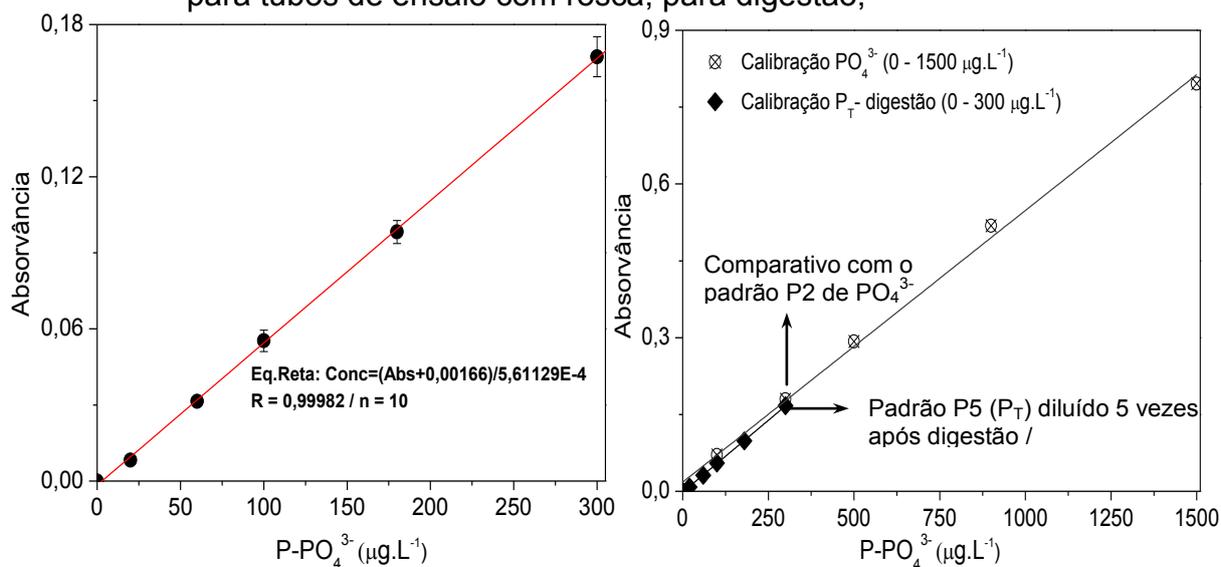
17. Realizar comparação com a curva analítica apresentada na **Figura 11a:**
- (a) (b)

Figura 11. (a) Exemplo de curva analítica de KH_2PO_4 aplicada à calibração do método de digestão / colorimétrico para determinação de Fósforo Total (P_T) em amostras de água e de efluentes líquidos e **(b)** Exemplo comparativo entre a calibração para PO_4^{3-} , com ausência da etapa de digestão, e calibração para P_T com presença da etapa de digestão / neutralização.

ATENÇÃO: verifique a seguinte etapa da metodologia: ao adicionar 5ml do padrão para digestão e após a neutralização, ter aferido para 25ml, você realizou uma diluição de 5 vezes, ou seja, o padrão deve estar, teoricamente, 5 vezes mais diluído que o valor encontrado para a curva de calibração de Ortofosfato (POP nº. 12). Um exemplo pode ser observado na **Figura 11b.**

1.2. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE P_T EM AMOSTRAS

1. Homogeneizar bem a amostra presente no frasco de coleta;
2. Com o auxílio de uma pipeta volumétrica, transferir 5ml da amostra para tubos de ensaio com rosca, para digestão;



3. Juntamente aos padrões, realizar prova em branco utilizando alíquotas de 5ml de água destilada;

4. Adicionar a cada tubo, 2,5ml da solução digestora alcalina;
5. Fechar bem os tubos para digestão e misturar por inversão;
6. Manter na autoclave, por um período de 25min após atingir a temperatura de 120°C e pressão de 14 kg.cm⁻². Neste momento, mudar a chave seletora de máximo para médio e controlar a possibilidade de aumento no manômetro de controle. Neste caso, mudar a chave para mínimo;
7. Após o término da digestão e resfriamento da autoclave, retirar os tubos e aguardar que atinjam a temperatura ambiente;
8. Após esfriar, adicionar 1ml da solução tampão de borato e misturar por inversão;
9. No mesmo frasco, adicionar 1,5ml de água destilada e misturar por inversão;

ATENÇÃO: verifique a seguinte etapa da metodologia: ao adicionar 5ml do padrão para digestão e após a adição dos reagentes seguintes (solução digestora, solução tampão e água), a amostra foi diluída, neste caso, 2x, fator este que deve ser utilizado na correção da concentração de P_T quantificada.

10. Adicionar a esta alíquota 2ml da solução reativa combinada (Mix).
Repetir o mesmo procedimento para as demais amostras e réplicas;
11. Fechar o frasco e misturar por inversão;
12. Aguardar 10min para o desenvolvimento e estabilidade da cor;
13. Leitura em espectrofotômetro ($\lambda = 880\text{nm}$). Tempo máximo para leitura de 45min;

1.3. CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO

Quantificação da concentração de P_T (mg.L⁻¹ ou µg.L⁻¹) através da equação da reta, obtida na curva analítica (calibração) para P_T.

1.4. LIMITE DE DETECÇÃO

O método para quantificação de P_T está relacionado com o método utilizado na quantificação de ortofosfato (PO₄³⁻). Assim, segue a faixa de leitura

descrita para ortofosfato: quantificação para concentrações $< 1500 \mu\text{g.L}^{-1}$ com valor mínimo detectável de $5 \mu\text{g.L}^{-1}$.

2. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO TOTAL DISSOLVIDO (P_{TD}) EM AMOSTRAS

A quantificação de fosfato total na fração dissolvida (P_{TD}) pode ser realizada seguindo a metodologia descrita para fosfato total (P_T). Entretanto, a única diferença é uma etapa adicional de pré tratamento da amostra:

A amostra deve, primeiramente, ser filtrada em membrana de acetato de celulose $\varnothing 0,45\mu\text{m}$ para obtenção da fração dissolvida e, na sequência, seguir o método da digestão alcalina (fechada).

3. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO TOTAL PARTICULADO (P_{TP}) EM AMOSTRAS

3.1. MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO

A quantificação da concentração de fosfato total, presente na fração particulada (P_{TP}) pode ser obtida a partir da subtração da concentração de fosfato total dissolvido (P_{TD}) pela concentração encontrada para fosfato total (P_T):

$$P_{TP} = P_T - P_{TD} \quad (13)$$

4. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO ORGÂNICO DISSOLVIDO / SOLÚVEL (P_{OrgD}) EM AMOSTRAS

4.1. MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO

A quantificação da concentração do fósforo orgânico dissolvido (P_{ORG}), presente na amostra pode ser obtida a partir da subtração da concentração de

ortofosfato (PO_4^{3-}), *POP N.º 12* pelo resultado encontrado para a concentração de fosfato total dissolvido (P_{TD}):

$$\mathbf{P_{\text{OrgD}} = P_{\text{TD}} - \text{PO}_4^{-3} \text{ (14)}}$$

5. REFERÊNCIAS

MURPHY, J.; RILEY, J.P. **A Modified Single Solution Method for the Determination of Phosphate in Natural Water**. *Anal.Chim.Acta*, Vol. 27, pp. 31-36, 1962

STANDARD METHODS, *method 4500 - P E* (Apha, 1998)