

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAROLINA PEREIRA DOS SANTOS

ANÁLISE DE RETENÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

E DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADO VERDE

EXTENSIVO SOBRE TELHADO DE FIBROCIMENTO

Pato Branco

2019

CAROLINA PEREIRA DOS SANTOS

**ANÁLISE DE RETENÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E
DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADO VERDE EXTENSIVO
SOBRE TELHADO DE FIBROCIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Linha de pesquisa: Tecnologia Ambiental no Ambiente Construído da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Cesar Augusto M. Destro

Coorientadora: Prof^a. Dr.^a Flávia Gizele König Brun

Pato Branco

2019

S237a Santos, Carolina Pereira dos.
Análise de retenção do escoamento superficial e desempenho térmico de telhado verde extensivo sobre telhado de fibrocimento / Carolina Pereira dos Santos. -- 2019.
111 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Cesar Augusto Medeiros Destro
Coorientadora: Profa. Dra. Flávia Gizele König Brun
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pato Branco, PR, 2019.
Bibliografia: f. 92 - 100.

1. Telhados. 2. Isolamento térmico. 3. Águas pluviais - Retenção. 4. Edifícios - Propriedades térmicas. I. Destro, Cesar Augusto Medeiros, orient. II. Brun Flávia Gizele König, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 22. ed. 624

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação n.º 36

“Análise da Retenção do Escoamento Superficial e Desempenho Térmico de Telhado Verde Extensivo sobre Telhado de Fibrocimento”

por

Carolina Pereira dos Santos

Dissertação apresentada às quatorze horas, do dia vinte e sete de junho de dois mil e dezanove, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus Pato Branco*. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Cesar Augusto Medeiros Destro
(orientador)
UTFPR/PB

Prof. Dr. Murilo Cesar Lucas
UTFPR/PB

Prof^a. Dr^a. Aurea Lúcia Vendramin Georgi
(participação à distância)
Mackenzie/SP

Prof. Dr. Murilo Cesar Lucas
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil - PPGEC/UTFPR

A via original do Termo de Aprovação, devidamente assinada, encontra-se na Coordenação do PPGEC.

DEDICATÓRIA

À minha família.

AGRADECIMENTOS

À Deus que permitiu a concretização de mais um sonho.

Ao meu marido Cleiton e aos meus filhos, Lorenzo, Cecilia e Sofia, pelos inúmeros momentos de paciência e de compreensão na minha ausência.

Aos meus pais Teolides e Dalmari pelo investimento e incentivo. Por me proporcionarem a oportunidade de dar sequência aos meus estudos. Também por me ensinarem a ter dedicação e foco.

Aos meus sogros Nelcy e Zair pelo zelo com as crianças. Aos meus irmãos Manoel e Patricia pelo apoio.

Ao meu orientador Cesar Destro, por aceitar a minha pesquisa e acreditar nela. Pela atenção e dedicação. Por ser um orientador presente, que muito contribuiu na elaboração desta pesquisa.

À minha coorientadora Flávia Brun, pelo suporte com a bancada experimental na UTFPR - campus Dois Vizinhos. Pela disponibilidade e pelas contribuições com a pesquisa.

Aos meus colegas Daise, Daniele e Angelo pelo companheirismo durante toda a pós-graduação.

Às queridas Silmara e Makerli pela disponibilidade em todos os momentos.

À todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, se envolveram e contribuíram com a pesquisa.

“No século XXI a arquitetura, sem desprezar o belo e a plasticidade das formas, o conforto e a funcionalidade, terá que forçosamente reencontrar o meio ambiente cujo equilíbrio é de fundamental importância para a sobrevivência da espécie humana na terra. ”

Corbella e Yannas (2003)

RESUMO

SANTOS, Carolina Pereira dos. **Análise de retenção do escoamento superficial e desempenho térmico de telhado verde extensivo sobre telhado de fibrocimento**: 2019. 111 f. Dissertação de Mestrado, do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Pato Branco, 2019.

As telhas de fibrocimento são bastante utilizadas nas coberturas das edificações devido ao seu baixo custo e facilidade de instalação. Este tipo de cobertura permite a transmissão de temperaturas externas e internas, fazendo com que o edifício não cumpra parte de sua função de abrigo e proporcione conforto térmico. Além disso, as telhas de fibrocimento favorecem para o escoamento rápido da água da chuva, o que pode contribuir problemas de inundação nas cidades. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi comparar diferentes tipos de tratamentos em telhados de fibrocimento do ponto de vista da retenção de água da chuva e eficiência térmica. Os experimentos foram realizados em condições naturais no município de Dois Vizinhos-PR. A pesquisa foi realizada em escala de campo, com nove módulos de telhados sobre uma bancada, submetidas a três diferentes tratamentos: telhado de fibrocimento exposto, telhado de fibrocimento com argila expandida e telhado verde extensivo sobre telha de fibrocimento. A vegetação escolhida foi a Grama Missioneira (*Axonopus sp*). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado. Os dados foram coletados em 25 eventos independentes de chuva. Os dados de temperatura foram coletados às 7h, 12h e 18h, no outono, inverno e primavera, obtidas por meio de um termômetro de medição superficial. A lâmina mediana total precipitada retida pelos telhados verdes foi de 70%, enquanto que a retenção mediana na argila expandida foi de 30% e das telhas de fibrocimento foi de 6%. Quanto ao desempenho térmico, as coberturas que demonstraram maior eficiência foram os telhados verdes, posteriormente a argila expandida. Em relação a variação de temperatura, a menor constatada foi a dos telhados verdes com 27,2°C, seguidos pelas coberturas de fibrocimento com 39,8°C. A argila expandida apresentou a maior variação de temperatura com 47,9°C. Os telhados verdes podem ser utilizados como alternativa na redução do escoamento superficial e na eficiência térmica das edificações.

Palavras chave: cobertura verde, telhado leve, desempenho térmico, retenção de águas pluviais.

ABSTRACT

SANTOS, Carolina Pereira dos. **Evaluation of extensive green roofs over fiber cement roof for runoff retention and thermal performance:** 2019. 111 f. Dissertação de Mestrado, do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Pato Branco, 2019.

Fiber cement tiles are widely used in building coverings because of its low cost and ease of installation. This type of roof cover allows the transmission of external and internal temperatures, causing the building to fail to fulfill part of its shelter function and to provide thermal comfort. Moreover, fiber cement tiles contribute to the rapid runoff of rainwater, which can contribute to flooding problems in cities. In this sense, the aim of this work was to compare different types of treatments on fiber cement roofs from the standpoint of rainwater retention and thermal efficiency. The experiments were performed under natural conditions in the municipality of Dois Vizinhos-PR. The research was carried out in field scale, with nine roof modules on a bench, subjected to three different treatments: exposed fiber cement roof, expanded clay on fiber cement roof, and extensive green roof over fiber cement tiles. The chosen vegetation was Gramma Missioneira (*Axonopus sp*). The experiment design was completely randomized. The data were collected in 25 independent rain events. The temperature data were collected at 7 a.m., 12 a.m., and 6 p.m., in the autumn, winter and spring seasons by using a surface measurement thermometer. The green roofs retained about 70% of the total precipitation. On the other hand, the expanded clay retained about 30%, and the fiber cement tiles retained about 6% of the total precipitation. With regard to thermal performance, the green roofs were the most efficient. Moreover, the external temperature on the green roofs showed less variation with 27,2°C. The highest external temperature variation was observed on the expanded clay treatment with 47,9°C. In conclusion, the green roofs can be used as an alternative in reducing runoff and in increasing the thermal efficiency of buildings.

Keywords: green roof, light roof, thermal performance, rainwater retention.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de hidrograma de escoamento.	22
Figura 2 – Sistemas de esgoto separador absoluto (a) e unitário (b).	23
Figura 3 – As quatro categorias dos SuDS.	25
Figura 4 – Ilustração esquemática de fontes alternativas de água, com ênfase na minimização da importação de água potável para a exportação de efluentes e estuários do ambiente construído.	27
Figura 5 – Estrutura urbana, paisagem, tecido e metabolismo contribuem para o efeito de ilha de calor urbana nas cidades.	29
Figura 6 – Zoneamento bioclimático brasileiro.	31
Figura 7 – Balanço hídrico entre um telhado verde e um telhado convencional.	40
Figura 8 – Escoamento superficial (<i>runoff</i>), entre um telhado tradicional e um telhado verde, ambos com inclinação de 20°, durante 24 horas, 14,6 mm de chuva, em abril de 2003.	40
Figura 9 – Representação das trocas de calor de um telhado verde e de um telhado de fibrocimento.	44
Figura 10 – Utilização da arquitetura vernacular em Kassel, Alemanha.	46
Figura 11 – Imagem artística dos Jardins Suspensos da Babilônia.	47
Figura 12 – Telhado verde do Palácio Gustavo Capanema.	48
Figura 13 – Composição de um telhado verde extensivo.	49
Figura 14 – Telhado verde extensivo sobre residência, Curitiba.	50
Figura 15 – Composição de um telhado verde intensivo.	52
Figura 16 – Telhado verde intensivo, cobertura do edifício da Fundação Cásper Líbero,	52
Figura 17 – Camadas de um telhado verde.	54
Figura 18 – Localização do Brasil, com destaque para o estado do Paraná e o município de Dois Vizinhos.	56
Figura 19 – Zoneamento bioclimático brasileiro e destaque para a zona bioclimática 2.	57
Figura 20 – Localização do Brasil, com destaque para o estado do Paraná e o município de Dois Vizinhos e local de implantação da bancada experimental.	58
Figura 21 – Estação Meteorológica A843.	58
Figura 22 – Planta baixa do protótipo.	60
Figura 23 – Corte esquemático.	60
Figura 24 – Modelagem do protótipo.	61
Figura 25 – Fixação das vigas e caibros.	62

Figura 26 – Disposição das chapas de compensado e confecção dos módulos.....	62
Figura 27 – Módulos isolados e canos colocados.....	63
Figura 28 – Colocação das telhas de fibrocimento.....	63
Figura 29 – Argila expandida.	64
Figura 30 – Preparo para receber os telhados verdes.	64
Figura 31 – Colocação do substrato.	65
Figura 32 – Bancada experimental finalizada.	65
Figura 33 – Protótipo revestido.	66
Figura 34 – Termômetro para medição da temperatura superficial.....	67
Figura 35 – escoamento superficial (mm) dos tratamentos analisados em relação ao módulo controle para o mês de junho de 2018.	73
Figura 36 – Coeficiente de retenção (%) do escoamento superficial dos módulos de telhado verde, argila expandida e fibrocimento no período de dezembro/2017 a novembro/2018.	74
Figura 37 – Temperatura superficial externa e inferior da cobertura com telhado verde.	83
Figura 38 – Temperatura superficial externa e inferior da cobertura com argila expandida...	85
Figura 39 – Temperatura superficial externa e inferior da cobertura com fibrocimento.	86
Figura 40 - Dados de precipitação de 2007 a 2014.	111
Figura 41 - Dados de precipitação de 2007 a 2014.	111
Figura 42 - Dados de evapotranspiração potencial de 2007 a 2014.	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Organização das escalas espacial e temporal do clima.....	28
Tabela 2 – Absortividade em função da cor.	32
Tabela 3 – Materiais e seus respectivos valores quanto a densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e o calor específico (c).	33
Tabela 4 – Valores das temperaturas superficiais internas, nos distintos tipos de cobertura analisados, com suas respectivas amplitudes e amortecimento térmicos.....	45
Tabela 5 – Dados de precipitação (mm) do módulo controle (mm) da bancada experimental nos dias de coleta.	69
Tabela 6 – Retenção do escoamento pluvial coletados nos galões dos respectivos tratamentos.	70
Tabela 7 – Água da chuva escoada (mm) nas coberturas por mês de coleta.....	74
Tabela 8 – Resistência térmica calculada para cada componente da cobertura de fibrocimento.	76
Tabela 9 – Resistência térmica calculada para cada componente da cobertura com argila expandida.....	76
Tabela 10 – Resistência térmica calculada para cada componente da cobertura com telhado verde.	77
Tabela 11 – Dados da temperatura superficial externa (°C) e inferior (°C) das diferentes coberturas no período do outono.	79
Tabela 12 – Dados da temperatura superficial externa (°C) e inferior (°C) das diferentes coberturas no período do inverno.	80
Tabela 13 – Dados da superficial externa (°C) e inferior (°C) das diferentes coberturas no período da primavera.	82
Tabela 14 – Temperaturas superficiais externas e inferiores extremas por estação.....	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SuDS	Drenagem Urbana Sustentável
WSUD	<i>Water Sensitive Urban Design</i>
BMP	Melhores Práticas de Gestão
LID	Desenvolvimento de Baixo Impacto
GI	Infraestrutura Verde
GEE	Gases de Efeito Estufa

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	condutibilidade térmica
c	calor específico
α	absortividade
ε	emissividade
ρ	refletividade
R	resistência térmica
R_t	resistência térmica total
e	espessura
U	transmitância térmica
P	precipitação
S	armazenamento
ET	evapotranspiração
Σ	somatório

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	20
2.1 Geral	20
2.2 Específicos	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Processo de urbanização e consequências no ciclo hidrológico.....	21
3.1.1 Abordagem tradicional do sistema de drenagem urbana sistema unitário e separador absoluto.....	22
3.1.2 Abordagem sustentável da drenagem urbana	24
3.2 O clima urbano	27
3.3 Conforto térmico da edificação	30
3.3.1 Zoneamento bioclimático brasileiro	31
3.3.2 Desempenho térmico da cobertura	32
3.4 Telhados verdes	34
3.4.1 Benefícios dos telhados verdes.....	35
3.4.1.1 Benefícios hidrológicos	39
3.4.1.2 Benefícios térmicos	42
3.4.2 Histórico	46
3.4.3 Tipos de telhado verde.....	48
3.4.3.1 Telhado verde extensivo.....	49
3.4.3.2 Telhado verde intensivo	51
3.4.4 Composição geral	53
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
4.2 Localização do experimento	57
4.3 Delineamento experimental	59

4.4 Projeto da bancada experimental	59
4.5 Implantação do experimento	61
4.6 Método para a coleta de dados	66
4.7 Estimativa de resistência e transmitância térmica do experimento	68
4.8 Análise estatística.....	68
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5.1 Dados de precipitação coletados do experimento	69
5.2 Comparações do escoamento pluvial entre os diferentes tipos de cobertura.....	73
5.3 Desempenho térmico dos módulos experimentais	75
5.4 Dados de temperatura coletados do experimento.....	78
5.5 Comparações do desempenho térmico entre os diferentes tipos de cobertura	83
6 CONCLUSÕES.....	91
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
APÊNDICE A – PROJETO ARQUITETÔNICO DO EXPERIMENTO	102
APÊNDICE B – GRÁFICOS DE TEMPERATURA EXTERNA E INFERIOR	107
APÊNDICE C – TABELA DE TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS	110
ANEXOS – DADOS METEOROLÓGICOS DE 2007 A 2014.....	111

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente urbanização, o deslocamento da população para as cidades tem exercido grande pressão sobre o meio ambiente. O impacto causado por esse crescimento afeta os recursos naturais, como a perda da cobertura vegetal e aumento das áreas impermeáveis, que acelera o escoamento superficial (NIEMCZYNOWICZ, 1999) resultando na sobrecarga da drenagem urbana (TUCCI, 1997), aumento das ilhas de calor e gases do efeito estufa (LI *et al.*, 2018; ROSPI *et al.*, 2017; SUSCA; GAFFIN; DELL'OSSO, 2011; YANG *et al.*, 2016).

A urbanização brasileira se caracteriza por lotes que oferecem pouca área para infiltração da água da chuva (TUCCI, 1997), desta forma, diminuem a possibilidade de conforto térmico no entorno da edificação. Os telhados contribuem com esta problemática, pois constituem cerca de 20% a 25% da superfície urbana, a pavimentação 40%, totalizando mais de 60% de área impermeável, segundo a pesquisa realizada por Rose, Akbari e Taha (2003) em algumas áreas metropolitanas dos Estados Unidos. Os usos de telhados impermeáveis contribuem significativamente para a redução das inundações e enchentes.

As telhas onduladas de fibrocimento correspondem a cerca da metade da área de telhados no Brasil (JOHN; SAVASTANO JUNIOR, 2014). Estes materiais popularmente utilizados na cobertura são caracterizados pela rápida transferência da temperatura para o interior/exterior da edificação, porque possuem alta condutividade térmica (ABNT, 2003). Dessa forma, a edificação deixa de cumprir a função de abrigo térmico e de propiciar conforto aos usuários. Trata-se da parte da edificação que está mais exposta às variações climáticas (ABREU *et al.*, 2011; MUSY; MALYS; INARD, 2017). O grande volume de água da chuva escoada do telhado pode provocar impactos negativos nas microbacias urbanas (STOVIN; POE; BERRETTA, 2013).

A combinação entre os vértices social, tecnologia e sustentabilidade possibilita diminuir o impacto ambiental causado pela urbanização, por meio de estratégias que promovam uma mudança na drenagem urbana convencional. As medidas estruturais comumente adotadas utilizam princípios tais como a infiltração, atenuação, transporte, armazenamento e tratamento biológico (BALLARD *et al.*, 2015; PALLA; GNECCO; LANZA, 2010).

Segundo Stovin, Poe e Berretta (2013), os sistemas de drenagem sustentável além de controlar a quantidade de escoamento, melhoram a qualidade da água urbana,

reduzindo o volume nas galerias pluviais. Dentre as filosofias internacionais de drenagem sustentável podem ser citados os Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SuDS), que incluem medidas de telhados verdes, trincheiras e valas de infiltração, jardins de chuva, bacias de retenção e retenção, dentre outros.

Diante deste contexto, há outros conceitos semelhantes, como Melhores Práticas de Gestão (BMP), Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) e Infraestrutura Verde (GI), com eficiência no desempenho de retenção de águas pluviais a longo prazo.

Com a função de medida de controle na fonte, os telhados verdes têm sido indicados como opção de cobertura capaz de proporcionar várias vantagens às coberturas convencionais, pois constituem uma importante e excelente estratégia bioclimática. Seu desempenho nos quesitos retenção do escoamento superficial e conforto ambiental tem mostrado eficiência em várias pesquisas (KOLB, 2003; SIMMONS *et al.*, 2008; WONG *et al.*, 2003a).

Entre outros possíveis benefícios, os telhados verdes podem contribuir para a diminuição do pico de escoamento superficial, aumentando o tempo de concentração de bacias hidrográficas urbanizadas (MENTENS; RAES; HERMY, 2006; PALLA; GNECCO; LANZA, 2010; STOVIN; VESUVIANO; KASMIN, 2012; STOVIN; POE; BERRETTA, 2013; BALLARD *et al.*, 2015; DARAIA; REDA, 2017).

Este fator está diretamente ligado ao aumento de áreas permeáveis urbanas, utilizando a superfície livre das coberturas das edificações para compensar a falta de áreas verdes, aumentando a infiltração da água da chuva, auxiliando na drenagem, mitigando os problemas urbanos (LIESCHEIDT, 2011; CARTER; KEELER, 2008; TEEMUSK; MANDER, 2007; VIDMAR; KELLEY; BERGHAGE, 2007; BALLARD *et al.*, 2015).

Algumas pesquisas se destacam quanto aos demais benefícios dos telhados verdes: alteram os fatores microclimáticos (YANG *et al.*, 2016; MUSY; MALYS; INARD, 2017; ROSPI *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2018), aumentam a vida útil dos telhados (LIU, 2004; MONTERUSSO; ROWE; RUGH, 2005; SUSCA; GAFFIN; DELL'OSSO, 2011), melhoram a qualidade do ar (PECK *et al.*, 1999; YANG; YU; GONG, 2008), melhoram o visual paisagísticos e efeitos psicológicos (RELF; MCDANIEL; BUTTERFIELD, 1992; RELF; LOHR, 2003; TEEMUSK; MANDER, 2007; MINKE; 2005), entre outros.

Nesse sentido, o objetivo da pesquisa foi comparar coberturas com telhado de fibrocimento, telhado de fibrocimento com argila expandida e telhado de fibrocimento

com presença de vegetação, em termos de retenção de água da chuva e desempenho térmico das coberturas.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Comparar as coberturas de telhado de fibrocimento, telhado de fibrocimento com argila expandida e telhado de fibrocimento com telhado verde, a fim de quantificar a retenção de água da chuva e desempenho térmico.

2.2 Específicos

A presente pesquisa tem como objetivos específicos:

- Verificar a capacidade de retenção de água de chuva do sistema de telhado verde em relação aos telhados com argila expandida e os de fibrocimento;

- Verificar o comportamento térmico do telhado verde em relação aos telhados com argila expandida e telhado de fibrocimento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordado uma revisão sobre o processo de urbanização, os sistemas de drenagem urbana tradicionais, as principais abordagens sustentáveis com foco nas medidas de telhados verdes; clima urbano e a problematização da ilha de calor urbano; o conforto térmico da edificação, zoneamento brasileiro e desempenho térmico da cobertura; os telhados verdes, seus benefícios e os principais tipos.

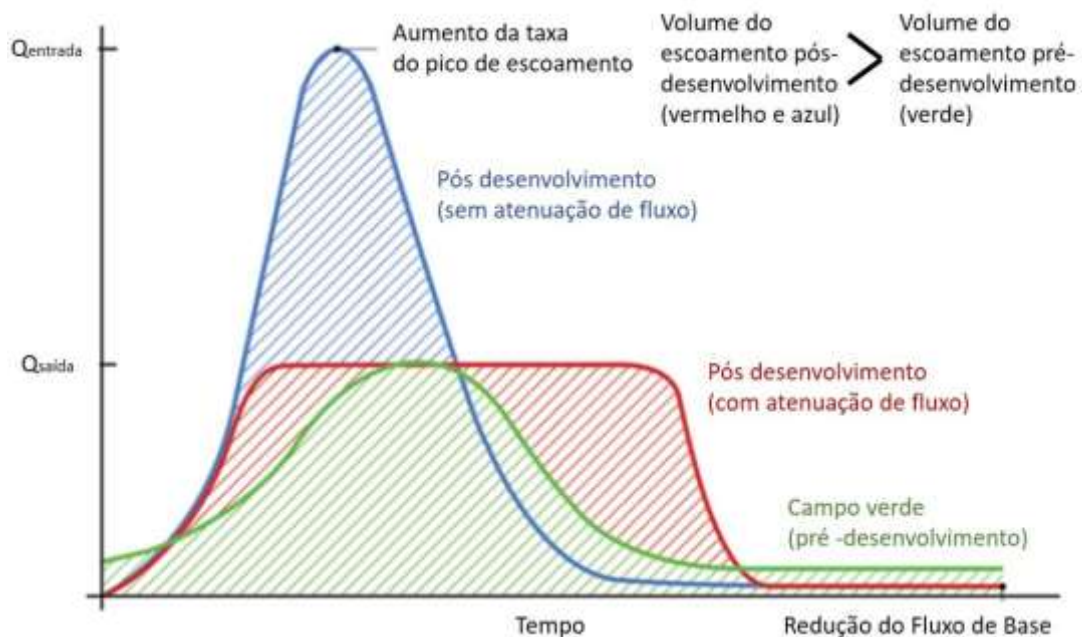
3.1 Processo de urbanização e consequências no ciclo hidrológico

Segundo os dados da ONU, 54% da população mundial vive em áreas urbanas, e a perspectiva para o ano de 2050, é ultrapassar 70%. O número de pessoas morando em favelas aumentou de 760 milhões em 2000, para 863 milhões em 2012 (ONU, 2013). “O ano 2000 marcou o momento em que pela primeira vez na história da humanidade a população urbana superou a rural. ” (EDWARDS, 2008).

A partir desse cenário é possível elencar os danos ambientais, econômicos e sociais que o planeta, conseqüentemente, a população vem enfrentando como, a elevação das temperaturas, os problemas de saúde causados pela poluição do ar e a contaminação da água, a escassez de alimentos, a falta de energia, entre outros (EDWARDS, 2008; TUCCI, 1997). Foi a partir da década de 60 que estes danos começaram a ser mais evidenciados.

A medida que a população se urbaniza, aumenta a construção de superfícies duras e impermeáveis, fazendo com que as águas pluviais sejam rapidamente escoadas para as canalizações, sobrecarregando os sistemas de drenagem (EDWARDS, 2008) aumentando as vazões máximas, antecipando seu tempo de pico.

A figura 1 representa um hidrograma com três situações diferentes de escoamentos.



Nota: O volume do escoamento equivale à área sob o hidrograma.

Figura 1 – Exemplo de hidrograma de escoamento.

Fonte: Adaptado de Ballard *et al.* (2015)

A falta de infiltração da água da chuva tende a reduzir o nível do lençol freático, diminuindo a recarga das águas subterrâneas em períodos de seca. Ademais, pela ausência da cobertura natural ocorre a redução da evapotranspiração, provocada pelo solo e vegetação (TUCCI, 1997), estes fatores acima descritos causados pelo impacto da urbanização, alteram o balanço hídrico natural aumentando o risco de enchentes.

No início do século XIX, a partir da reforma higienista¹, as cidades passaram a adotar soluções para a drenagem das águas pluviais (OHNUMA JUNIOR, 2008).

3.1.1 Abordagem tradicional do sistema de drenagem urbana sistema unitário e separador absoluto

O primeiro sistema utilizado foi o sistema unitário, que consiste em uma única rede de coletores transportando o esgoto proveniente das edificações juntamente com as águas pluviais. Após a coleta, o esgoto é destinado para longe dos centros urbanos. Estes sistemas, porém, são considerados altamente poluentes e geram grandes riscos de doenças

¹ Segundo Tucci (2012), anteriormente, população sofria com a contaminação nas fontes de abastecimento de água e proliferação de doenças infecciosas. A reforma higienista tinha como objetivo dar melhores condições sanitárias a população através de um abastecimento de fontes seguras e promovia a coleta de esgoto.

(BROMBACH; WEISS; FUCHS, 2005). A maioria dos países europeus, como Portugal e Alemanha, utilizam o sistema de drenagem urbana unitário (MARQUES *et al.*, 2013).

Na década de 60, após um período de conscientização ambiental, se passou a separar a água da chuva do esgoto doméstico. Surge então o sistema separador absoluto, que consiste na individualização das redes pluviais e esgoto (MARQUES *et al.*, 2013). No Brasil, a maioria dos sistemas adotados é do tipo separador, no entanto, em algumas cidades antigas ainda prevalece o sistema unitário (TUCCI, 1997).

Um esquema básico dos sistemas separador absoluto e unitário pode ser visto na figura 2.

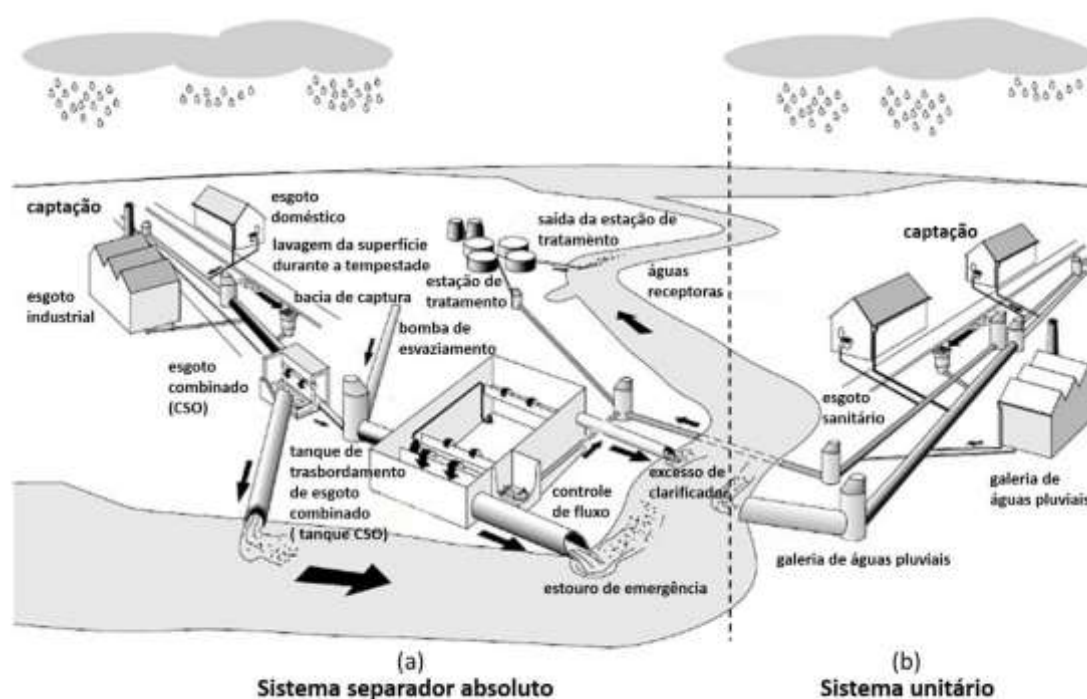


Figura 2 – Sistemas de esgoto separador absoluto (a) e unitário (b).

Fonte: Adaptado de Brombach, Weiss e Fuchs (2005)

O sistema separador é eficiente, porém o escoamento é feito de forma rápida, na tentativa de transferir rapidamente a água para fora das áreas vulneráveis à alagamentos (GOLDENFUM *et al.*, 2007). Dessa forma, o sistema causa pressão nas tubulações, acelerando o fluxo da jusante, transferindo para lá o problema da inundação (MOLINA *et al.*, 2017).

Sob uma nova visão de gestão de águas pluviais surgem as abordagens sustentáveis, buscando incorporar os cursos d'água à paisagem urbana (PINTO;

PINHEIRO, 2006), a fim de promover uma paisagem mais funcional hidrológicamente (PALLA; GNECCO; LANZA, 2010).

Os referidos sistemas baseiam-se em tecnologias ambientais seguras com implantação em pequena escala (NIEMCZYNOWICZ, 1999), capazes de promover a evapotranspiração, infiltração da água da chuva e percolação de forma natural, visando proteger os recursos hídricos (PALLA; GNECCO; LANZA, 2010; PINTO; PINHEIRO, 2006).

3.1.2 Abordagem sustentável da drenagem urbana

Com a atual realidade, se faz necessário a implantação de sistemas que reduzam a vazão e o volume de escoamento das superfícies impermeáveis. Nesse sentido, algumas abordagens mostram-se eficientes, como os SuDS, LID, BMP e WSUD. De maneira geral essas abordagens melhoram a gestão da água no sistema de esgoto convencional (PALLA; GNECCO; LANZA, 2010), incluem práticas baseadas na capacidade de remoção de poluentes hidrológicos: telhados verdes, trincheiras, valas, jardins de chuva, bacias de infiltração e lagoas (STOVIN; POE; BERRETTA, 2013).

Marlow *et al.* (2013) descrevem os benefícios centrais das abordagens sustentáveis comparadas ao sistema de drenagem tradicional: a naturalização do ciclo da água estabelecendo ecossistemas saudáveis, maior segurança hídrica com a diversificação de fontes locais para usos não potáveis, e eficiência dos recursos promovendo a sustentabilidade.

Essas abordagens são caracterizadas por se tratarem de soluções descentralizadas e de acordo com os seus focos têm diferentes denominações (BARBOSA; FERNANDES; DAVID, 2012; ZHANG *et al.*, 2017). Para a eficiência da gestão de águas pluviais, adota-se várias estratégias em conjunto em um mesmo local, uma complementando a outra, através de uma gestão combinada com tecnologias integradas (BACH *et al.*, 2014). Podem formar um quadro estratégico de planejamento local, como por exemplo, pavimentos permeáveis usados para estacionamentos, bacias de retenção para usos recreativos, telhados verdes para regular a temperatura (BALLARD *et al.*, 2015).

Os sistemas sustentáveis de drenagem urbana (SuDS), também chamados de sistemas de drenagem sustentáveis, tiveram início no Reino Unido no final de 1980 (FLETCHER *et al.*, 2014). Essa abordagem maximiza as oportunidades e benefícios que

garantem (BALLARD *et al.*, 2015) o gerenciamento das águas pluviais tentando replicar a drenagem natural.

Na figura 3 são apresentados os múltiplos benefícios dos SuDS através de quatro categorias principais: quantidade de água, qualidade da água, comodidade e biodiversidade. Na sua totalidade, os SuDS são eficazes tanto acima quanto abaixo do solo.



Figura 3 – As quatro categorias dos SuDS.
Fonte: Adaptado de Ballard *et al.* (2015)

Segundo o *The SuDS Manual* (BALLARD *et al.*, 2015), essa abordagem inclui sistemas de captação da água da chuva, telhados verdes, pavimentos permeáveis, sistemas de biorretenção, bacias de detenção, trincheiras, entre outros. Através de tecnologias que utilizam a natureza para recolher, infiltrar, retardar, armazenar, transportar e tratar o escoamento local. Dessa forma, os sistemas de drenagem sustentável conseguem lidar melhor com as chuvas intensas e problemas de infiltração reduzida, melhorar a qualidade do ar, regular temperaturas, reduzir ruídos, promover espaços atraentes e mais resistentes às mudanças climáticas, melhorar a qualidade de vida no meio urbano.

O LID tem sido mais utilizado nos países da América do Norte e Nova Zelândia, seguindo uma tendência com abordagem ligada a natureza, na tentativa de minimizar o custo de gestão de águas pluviais. Esta abordagem tem como premissa favorecer uma

hidrologia natural através do layout local e um controle de medidas integrado, ou seja, promover uma paisagem hidrológica funcional. O LID é caracterizado pelo tratamento de águas pluviais em pequena escala como sistemas de biorretenção, telhados verdes e vales, localizados na ou perto da fonte de escoamento. Com o passar dos anos, as soluções comuns foram sendo descartadas devido a incapacidade de restauração do sistema hidrológico (FLETCHER *et al.*, 2014).

As BMPs foram originadas em 1972 nos Estados Unidos, seguindo uma abordagem estruturada para evitar a poluição, a fim de restaurar a cobertura vegetal e o solo para manter as condições de fluxo da água. Este sistema inclui práticas não-estruturais (como boa limpeza, manutenção preventiva) e estruturais (como sistemas de biorretenção, infra-estrutura verde) (BARBOSA; FERNANDES; DAVID, 2012). As BMPs podem ser implantadas isoladamente ou aliadas a outras abordagens para reduzir os poluentes no escoamento de águas pluviais (FLETCHER *et al.*, 2014).

O termo WSUD foi criado na Austrália, atualmente é muito utilizado no Reino Unido e Nova Zelândia. Lloyd *et al* (2002 *apud* FLETCHER *et al.*, 2014) descreve o sistema como uma

“Abordagem filosófica do desenho e planejamento urbano que tem como objetivo minimizar os impactos hidrológicos do desenvolvimento do meio ambiente. A gestão das águas pluviais é um subconjunto do WSUD direcionado a fornecer controle de inundação, gerenciamento de fluxo, melhorias na qualidade da água e oportunidades para coletar águas pluviais para suplementar a água do sistema de abastecimento para usos não potáveis.”

As abordagens sustentáveis estão relacionadas com o esquema abaixo (figura 4), devem ser estruturadas a partir das características locais, de acordo com a disponibilidade orçamentária municipal e avaliação das combinações de medidas adequadas para tal necessidade (BARBOSA; FERNANDES; DAVID, 2012).

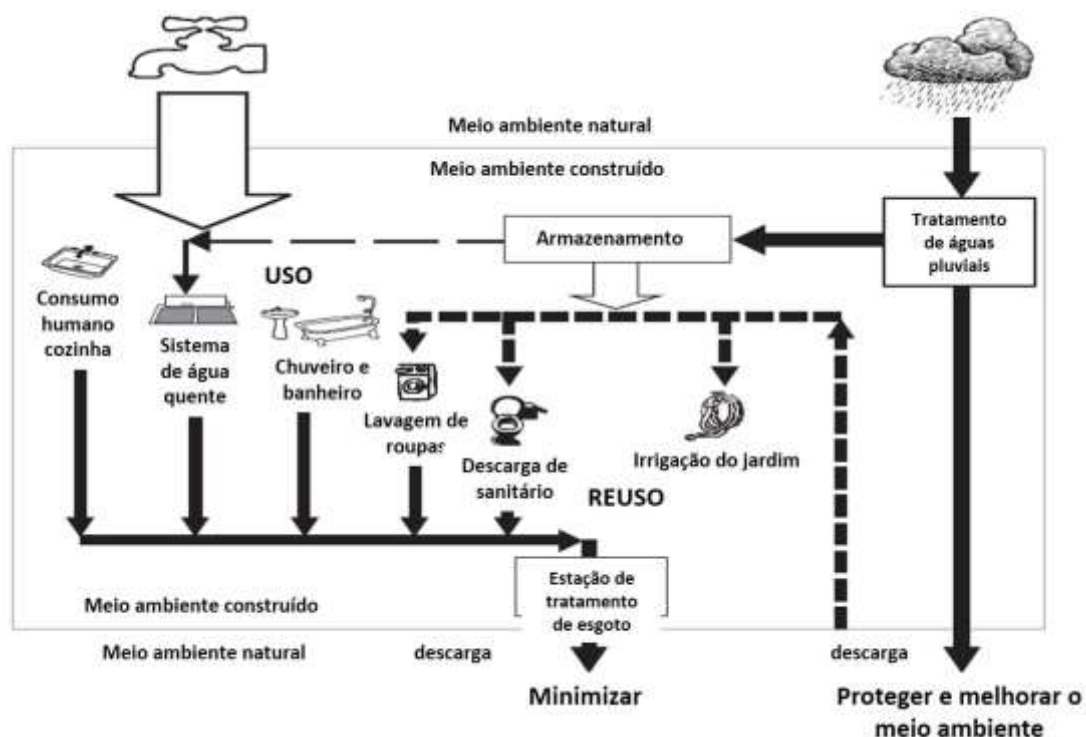


Figura 4 – Ilustração esquemática de fontes alternativas de água, com ênfase na minimização da importação de água potável para a exportação de efluentes e estuários do ambiente construído.

Fonte: Adaptado de Wong (2007)

Através da explanação das abordagens citadas, nota-se que são conceitos semelhantes adotados em diferentes países (FLETCHER *et al.*, 2014), todas estão direcionadas a reduzir o risco de inundações, além dos atributos de prevenção sanitária, proteção social e econômica.

3.2 O clima urbano

O clima é a soma dos fenômenos meteorológicos provenientes da atmosfera. Está classificado de acordo com as condições topográficas da Terra e são modificados pelas ações antrópicas (VIANNA; GONÇALVES, 2001).

De acordo com Mendonça e Danni-Oliveira (2011) a classificação por ordem de grandeza, as escalas espaciais e temporais do clima são apresentadas na tabela abaixo:

Tabela 1 – Organização das escalas espacial e temporal do clima.

Quadro de grandeza	Subdivisões	Escala horizontal	Escala vertical	Temporalidade das variações mais representativas	Exemplificação espacial
Macroclima	Clima zonal Clima regional	>2.000 km	3 a 12 km	Algumas semanas a vários decênios	O globo, um hemisfério, oceano, continente, os mares, etc.
Mesoclima	Clima regional Clima local Topoclima	2.000 km a 10 km	12 km a 100m	Várias horas a alguns dias	Região natural, montanha, região metropolitana, cidade, etc.
Microclima		10 km a alguns m	Abaixo de 100m	De minutos ao dia	Bosque, rua, edificação/casa, etc.

Fonte: Mendonça e Danni-Oliveira (2011)

O clima urbano resulta da associação de fatores variáveis (topografia, umidade relativa, radiação solar, vento, etc), da localização em que está inserido, somados às interações humanas realizadas no espaço urbano (VIANNA; GONÇALVES, 2001).

Devido as suas peculiaridades biofísicas (transporte, pavimentação, construções, atividades humanas), o ambiente urbano possui a temperatura do ar mais quente do que as áreas rurais (GARTLAND, 2010; YANG *et al.*, 2016). Em ambientes rurais, as plantas utilizam grande parte da energia solar no processo metabólico. A umidade controla a temperatura das plantas, que o transformam em vapor de água, reduzindo a temperatura do ar (MASCARÓ; MASCARÓ, 2005).

Nas áreas urbanas, os materiais que cobrem as superfícies são escuros, de pouca refletividade e compreendem características térmicas que retém o calor. O calor, a massa, a condutividade e a difusividade dos materiais (SOLTANI; SHARIFI, 2017) provocam aumento da temperatura pela absorção rápida da radiação solar (TUCCI, 1997). Segundo Adler e Tanner (2015), quatro horas de Sol intenso podem aumentar em 30°C a temperatura do asfalto ou de um telhado, mas a temperatura da água de um lago, nestas condições, somente 3,5°C.

A partir da constante manipulação dos ambientes naturais, as mudanças climáticas têm representando grande preocupação ao longo das últimas décadas (CARTER *et al.*, 2015; DOHERTY; KLIMA; HELLMANN, 2016; ZELENAKOVA *et al.*, 2015). Tais alterações resultam na escassez da superfície vegetal e diminuição do arrefecimento por evaporação (ZELENAKOVA *et al.*, 2015).

As grandes áreas impermeabilizadas asfaltadas e as coberturas expostas das edificações acentuam a formação do efeito urbano denominado “ilhas de calor²” e prejudicam a qualidade de vida no meio urbano (LI *et al.*, 2018; ROSPI *et al.*, 2017; SUSCA; GAFFIN; DELL’OSSO, 2011; YANG; YU; GONG, 2008).

A figura 5 ilustra situações distintas de desempenho térmico em ambientes urbanos.



Figura 5 – Estrutura urbana, paisagem, tecido e metabolismo contribuem para o efeito de ilha de calor urbana nas cidades.

Fonte: Adaptado de Sharifi e Lehmann (2014)

O efeito de ilha de calor urbano depende do comportamento térmico dos materiais de superfície e da exposição à radiação solar. As superfícies urbanas, como as coberturas e o asfalto, são aquecidas pelo sol e o calor emitido a partir da superfície, é misturado por meio de convecção, influenciando a temperatura do ar acima da superfície urbana (SOLTANI; SHARIFI, 2017).

Segundo Gartland (2010) a intensidade da ilha de calor fica mais elevada a noite, de modo que, as superfícies urbanas continuam a liberar calor acumulado e diminuem o arrefecimento durante o período noturno. O autor elencou alguns fatores que podem contribuir com a formação de ilhas de calor, como a falta de vegetação, utilização difundida de superfícies impermeáveis, maior difusividade térmica dos materiais urbanos, baixa refletância solar dos materiais urbanos, geometrias urbanas que aprisionam calor e

² Segundo Yang *et al.* (2016), o termo “ilhas de calor” é um fenômeno de acumulação de calor dentro da área urbana, devido à construção urbana e as atividades humanas.

diminuem as velocidades dos ventos, aumentos dos níveis de poluição e aumento da utilização de energia.

Segundo Heywood (2012), a Agência Ambiental do Reino Unido prevê, que em 2050, os verões estarão entre 1,5°C e 3,5°C mais quentes que em 2012, e que o efeito de ilha de calor que hoje adiciona entre 5°C e 6°C às temperaturas noturnas do verão, será mais intenso. O desequilíbrio térmico urbano e interno das edificações influencia diretamente no aumento do consumo de energia relacionado aos equipamentos como os refrigeradores, o uso excessivo desses equipamentos também eleva a temperatura global.

As estratégias para mitigar os efeitos de ilha de calor urbano podem ser consideradas, dentre outros aspectos, o desenho da cidade para favorecer a ventilação; materiais de construção refletivos, a fim de diminuir a absorção da radiação solar; e introdução de áreas verdes/vegetação, para infiltração do escoamento superficial, evapotranspiração das plantas, conseqüentemente, reduzir a temperatura do ar urbano (CARTER *et al.*, 2015; STEENEVELD *et al.*, 2018).

Nesse contexto, é necessário compreender as possíveis transformações urbanas, quanto a eficiência energética e otimização da paisagem. A utilização de materiais de maior albedo³ e superfícies verdes impactam diretamente no microclima, no intuito de promover a resiliência dos espaços construídos (GARTLAND, 2010; MASCARÓ; MASCARÓ; AGUIAR, 2001; SOLTANI; SHARIFI, 2017).

3.3 Conforto térmico da edificação

O desempenho das edificações deve atender as normativas técnicas (ABNT, 2003b, 2003a) para garantir o conforto térmico na habitabilidade dos usuários, contribuir na economia de energia e favorecer a sustentabilidade.

Segundo Mascaró, Mascaró e Aguiar (2001) as paredes e a cobertura são responsáveis pelo desempenho térmico das edificações. A cobertura fica mais exposta à radiação direta do sol, durante o dia o interior da edificação atinge maior temperatura e à noite, perde o calor mais rapidamente (MACHADO; BRITTO; NEILA, 2001; MICHELS; LAMBERTS; GUTHS, 2006).

³ Superfícies de alto albedo são caracterizadas por materiais mais refletivos à radiação solar (cores claras) e podem reduzir fortemente a carga de refrigeração da edificação (MASCARÓ; MASCARÓ; AGUIAR, 2001).

Este fenômeno de transferência, de variação da temperatura nas edificações chama-se troca térmica, compreendem as trocas secas: radiação⁴, condução⁵ e convecção⁶. O calor envolvido nas trocas secas é denominado calor sensível. As trocas úmidas envolvem a água, são: evaporação⁷ e condensação⁸. O calor latente é o envolvido nas trocas úmidas (FROTA; SCHIFFER, 2001).

3.3.1 Zoneamento bioclimático brasileiro

O zoneamento bioclimático brasileiro compreende oito diferentes zonas (figura 6), as quais foram divididas quanto a homogeneidade do clima. Para cada zona, segundo a NBR 15.220-3 (ABNT, 2003b), são indicadas as diretrizes construtivas relacionadas às estratégias de condicionamento térmico passivo quanto a aberturas, paredes e coberturas.

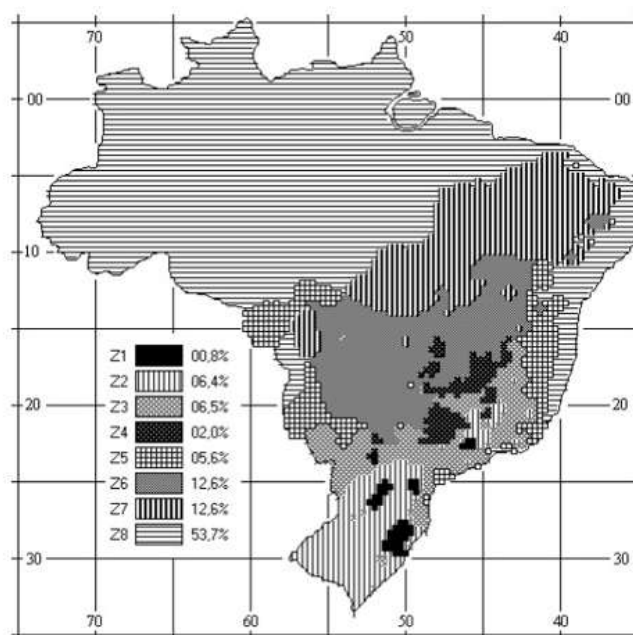


Figura 6 – Zoneamento bioclimático brasileiro.
Fonte: ABNT, 2003b

⁴ Troca de calor entre dois corpos, quanto a capacidade de emitir e de absorver energia térmica (FROTA; SCHIFFER, 2001).

⁵ Troca de calor entre dois corpos que se tocam ou que estejam a temperaturas diferentes (FROTA; SCHIFFER, 2001).

⁶ Troca de calor entre dois corpos, sendo um deles sólido e o outro fluido (líquido ou gás) (FROTA; SCHIFFER, 2001).

⁷ Troca úmida da mudança do estado líquido para o gasoso. Para ser evaporada, a água precisa de uma certa quantidade de energia (FROTA; SCHIFFER, 2001).

⁸ Troca úmida da mudança do estado gasoso do vapor da água contido no ar para o estado líquido. A condensação é acompanhada de uma certa quantidade de energia (FROTA; SCHIFFER, 2001).

A NBR 15.220-2 (ABNT, 2003a) trata o desempenho térmico das edificações e seus componentes. Contém equações e tabelas com as propriedades térmicas de diversos materiais de construção; apresentam condutividade térmica (λ) e calor específico (c) em função da densidade de massa aparente. Estabelece valores de absorvância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiações a temperaturas comuns (ondas longas).

3.3.2 Desempenho térmico da cobertura

A radiação solar incidente na cobertura terá uma parcela refletida (refletividade (ρ)) e a outra parcela absorvida (absortividade (α)). A absorvância determinante em um material é a sua cor superficial. Se a absorvância de um material for 0,8, significa que 80% da energia incidente será absorvida e 20% será refletida (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997). Através da equação 1 pode ser entendido:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (1)$$

Onde: α é a absorvância e ρ é a refletividade de um material.

Em função da cor, a absorvância (α) pode ser compreendida pela tabela 2.

Tabela 2 – Absortividade em função da cor.

CORES	α
Escuras	0,7 a 0,9
Médias (tijolos)	0,5 a 0,7
Claros	0,2 a 0,5

Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (1997)

A intensidade de fluxo de calor do material empregado dependerá da condutividade térmica (λ) e da sua densidade, isto resultará na capacidade que o material em questão tem de conduzir maior ou menor quantidade de calor. Quanto maior a condutividade térmica de um material, maior é a quantidade transferida entre as superfícies (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997).

Para exemplificar, a tabela 3 demonstra os valores de alguns materiais.

Tabela 3 – Materiais e seus respectivos valores quanto a densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e o calor específico (c).

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.k)	c (kJ/(kg.K))
Alumínio	2700	230	0,88
Zinco	7100	112	0,38
Argamassa comum	1800-2100	1,15	1,00
Concreto*	-	1,50	-
Placas de fibrocimento	1800-2200	0,95	0,84
	1400-1800	0,65	0,84
Tijolos e telhas de barro	1000-1300	0,70	0,92
Brita ou seixo	1000-1500	0,70	0,80
Placa de gesso; gesso acartonado	750-1000	0,35	0,84
Argila expandida	< 400	0,16	-
Betume asfáltico	1000	0,17	1,46
Madeira compensado	450-550	0,15	2,30
	350-450	0,12	2,30
Isopor*	-	0,03	-

Fonte: ABNT (2003a); Lamberts, Dutra e Pereira* (1997)

Na radiação solar, outro fator que deve ser analisado é a emissividade da superfície do material, ou seja, a quantidade de energia térmica que é emitida por unidade de tempo. A saber, os materiais de construção são organizados em dois grupos: os metálicos, que compreendem emissividades entre 0,05 a 0,30; e não-metálicos, entre 0,85 a 0,90 (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997).

Segundo a NBR 15.220-2 (ABNT, 2003a), para obter os valores de resistência térmica⁹ (R) recomenda-se que, para uma camada homogênea de material sólido seja determinada a equação 2.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (2)$$

Onde: e é a espessura da camada (m) e, λ é a condutividade térmica do material (W/mK).

O cálculo para a resistência térmica de um componente plano constituído de camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela equação 3.

⁹ Devem ser usados, sempre que possível, obtidos através de medições baseadas em ensaios normalizados (ABNT, 2003a).

$$Rt = Rt_1 + Rt_2 + \dots + Rt_n \quad (3)$$

Onde: Rt_1, Rt_2, \dots, Rt_n são as resistências térmicas ($m^2 K/W$) das n camadas homogêneas.

A transmitância térmica de componentes é o inverso da resistência térmica total, conforme a equação 4.

$$U = \frac{1}{Rt} \quad (4)$$

Onde: U é a transmitância térmica (W/m^2K) e Rt a é resistência térmica total (m^2K/W).

Com os dados obtidos através das tabelas (ABNT, 2003a; FROTA; SCHIFFER, 2001) e a realização dos cálculos, foi possível avaliar a transmitância térmica de cada cobertura quanto a sua eficiência, bem como analisar a necessidade de incluir outros materiais para melhorar o isolamento térmico.

As telhas apresentam características e propriedades diferentes conforme o material empregado e devem ser especificadas de acordo com a necessidade. Utilizar materiais de alta refletância na superfície externa e/ou reduzir a quantidade de energia térmica de onda longa irradiada para o interior da edificação com materiais de baixa emissividade são formas de diminuir os ganhos de calor pela cobertura (VITTORINO; SATO; AKUTSU, 2003).

3.4 Telhados verdes

O telhado verde é uma tecnologia sustentável e pode ser definido pela aplicação de vegetação sobre a cobertura das edificações devidamente impermeabilizados. Na literatura podem ser encontradas expressões como coberturas verdes (ANDRADE; DORNELES, 2017), coberturas vegetais (SANTESSO *et al*, 2017), telhados ecológicos (LIMA; BARROCA; D'OLIVEIRA, 2009), tetos verdes (AUGUSTO; SANTOS; SAMPAIO, 2012), telhados vivos (SILVA *et al*, 2013), entre outros.

Segundo Barbosa, Fernandes e David (2012), os telhados verdes têm sido eficientes na mitigação dos impactos do crescimento urbano, buscando soluções às questões ambientais. Essas soluções representam uma tentativa de transformar a área urbana em uma cidade sustentável (BALLARD *et al* 2015), criando uma interação entre natureza, cidadão e zona urbana, seja com a instalação de grama, flores, arbustos ou até mesmo hortaliças e plantas medicinais (RELF; MCDANIEL; BUTTERFIELD, 1992; RELF; LOHR, 2003) sobre os telhados.

O telhado verde caracteriza-se por se tratar de uma estratégia bioclimática que está em constante crescimento (KÖHLER *et al.*, 2002), onde os telhados convencionais dão lugar a coberturas ecológicas, substituindo parcialmente a vegetação retirada quando a edificação foi construída (CARTER; KEELER, 2008).

As adições de vegetação sobre as superfícies de telhado podem diminuir vários efeitos negativos locais, reduzir o consumo de energia dos edifícios, aumentar o isolamento do som, resistência ao fogo, longevidade da membrana do telhado, mitigar o escoamento de águas pluviais, manutenção de clima interno, melhoria da qualidade do ar, habitat para vida selvagem e redução do efeito de ilha de calor urbano (OBERNDORFER *et al.*, 2007).

3.4.1 Benefícios dos telhados verdes

Os telhados verdes são multifuncionais, fornecem inúmeros benefícios ambientais simultaneamente (CARTER; KEELER, 2008), compreendendo desde a melhoria das condições termo acústicas a fatores psicológicos que interferem no bem-estar das pessoas.

Destacam-se alguns dos benefícios do telhado verde:

Melhoria da qualidade do ar: Os telhados verdes atuam na produção de oxigênio, absorvem CO₂, melhoram a qualidade do ar, dentre outros benefícios. Segundo Peck *et al.* (1999), a vegetação reduz a quantidade de energia disponível para o aquecimento e filtra o ar. Deste modo, as partículas tendem a ficar presas nas folhas e, quando chove, estas partículas são levadas para o substrato. As plantas absorvem os poluentes gasosos através da fotossíntese e as sequestram em suas folhas. Estes fatores trazem benefícios às pessoas que sofrem de doenças respiratórias, diminuindo diretamente a poluição do ar.

Yang, Yu e Gong (2008) realizaram uma pesquisa com 170 telhados verdes, nos sistemas intensivo e extensivo, em Chicago, entre os meses de agosto de 2006 e julho de 2007. As fotografias aéreas digitais foram tiradas por *Pictometry International Corp* em julho de 2006, este software permite medir diretamente distancias e áreas sobre as imagens georreferenciadas. Foi avaliado o desempenho da remoção dos poluentes do ar pelos telhados verdes, tendo maior eficiência no mês de maio, quando as plantas foram completamente expandidas e a concentração de poluentes era alta. A menor remoção foi em fevereiro, quando as vegetações estavam cobertas de neve. Dos poluentes do ar pesquisados, PM₁₀ (tipo de partícula inalável), O₃ (ozônio), SO₂ (dióxido de enxofre) e NO₂ (dióxido de nitrogênio), a absorção de O₃ foi maior com 52% da absorção total, seguida por NO₂ (27%), PM₁₀ (14%) e SO₂ (7%).

Isolamento acústico: As camadas de um telhado verde funcionam como isolante do som. O nível de ruído excessivo urbano provocado por máquinas, tráfego, construções, afetam psicologicamente as pessoas. Os ruídos podem ser absorvidos pela vegetação, as frequências mais baixas são bloqueadas pelo substrato e as plantas bloqueiam as frequências mais elevadas. Peck *et al.* (1999) relatam que, através de testes, foi possível demonstrar que 12 cm da camada de substrato pode reduzir o som de 40 dB e, 20 cm pode reduzir o som de 46 dB. Deste modo, verifica-se que a altura da camada do substrato melhora a eficiência do isolamento, pois funcionam como barreiras acústicas.

A fim de medir o desempenho do isolamento acústico dos telhados verdes, Renterghem e Botteldooren (2011) avaliaram cinco casos que se diferenciavam pelo comprimento e profundidade do substrato. As medições foram realizadas imediatamente antes e imediatamente após a colocação dos telhados verdes, para serem diretamente estimados e na configuração fonte-receptor idênticos. A pesquisa mostrou que os telhados verdes podem levar a redução de som de até 10dB em relação a telhados convencionais. Os autores salientam que a eficiência dos telhados verdes é apresentada quando estão em condições secas, em eventos de chuva a eficiência pode ser significativamente menor.

Maior vida útil ao telhado: As coberturas convencionais de metais, betumes, chapas onduladas, argila, concreto, etc. tem vida útil limitadas por estarem expostas ao tempo. Minke (2005) afirma que um telhado verde sobre a cobertura seria totalmente protegido dos raios ultravioletas e de danos mecânicos, temperaturas extremas flutuações de temperatura rápida (MONTERUSSO; ROWE; RUGH, 2005). Os telhados verdes têm um ciclo de vida de 2 a 3 vezes mais longo que os tradicionais (VIDMAR; KELLEY; BERGHAGE, 2007).

Liu (2004) comparou duas áreas iguais de um telhado experimental em Ottawa, no Canadá, durante os anos de 2001 e 2002. Essa pesquisa teve apoio do Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá (NRC). O telhado foi dividido em duas partes iguais, de um lado foi instalado o telhado verde e de outro telhado de betume convencional, separados por divisória. Os resultados mostraram que, em um dia de verão, o telhado convencional apresentou 70°C, a temperatura do telhado verde manteve-se em torno de 25°C. O autor conclui que, esta exposição ao calor acelera o envelhecimento natural, reduzindo a durabilidade do telhado.

Proteção contra incêndios: Os telhados verdes podem ajudar a não propagação do fogo quando aliados a pedras e cascalhos nas edificações, ou seja, utilizar materiais que não entram em combustão. Plantas como as suculentas possuem alto índice de água no seu interior que retardam a atuação do fogo (LOPES, 2007).

Breuning (2008) relata que, na década de 90 enquanto crescia a construção de telhados verdes na Alemanha, paralelamente aumentava o medo de utilizá-los, em decorrência de uma suposta idéia que os telhados verdes aumentavam o risco de incêndios quando as plantas secavam. O autor desmitifica tal suposição descrevendo a pesquisa feita na cidade de Stuttgart, no laboratório *Baden-Württemberg* pelo governo.

Compararam uma impermeabilização betuminosa, que produz 50kWh/m² com um telhado verde extensivo com gramíneas, apresentando 3 kWh/m². Durante os meses de agosto a outubro, pesquisadores tentaram iniciar incêndios em telhados verdes que continham vegetações mortas e secas. Através da pesquisa foi concluído que o risco de alimentar incêndios é de 15 a 20 vezes maior em telhados descobertos do que em telhados verdes com gramíneas, perenes e *Sedums*, devido ao calor gerado pelo material.

Breuning (2008) afirma que, na Alemanha, há desconto de 10 a 20% sobre o seguro de incêndio quando instalado sobre a cobertura o sistema de telhados verdes.

Melhora do visual paisagístico e efeitos psicológicos: Um telhado verde integra a edificação com a paisagem, contribui esteticamente combatendo a poluição visual das cidades, remetendo a um visual contemplativo. Os topos das edificações podem dar lugar a jardins, hortas, parques, incrementando os espaços de lazer disponíveis na cidade, sem ocupar os espaços supervalorizados no solo urbano, proporcionando grande visibilidade e sensações de bem-estar aos moradores vizinhos (RELF; LOHR, 2003; TEEMUSK; MANDER, 2007).

Os telhados verdes, assim como os jardins, provocam bem-estar aos moradores. Alguns estudos (RELF; LOHR, 2003; TEEMUSK; MANDER, 2007) já demonstraram

que, a simples visão de uma área verde, traz benefícios a saúde humana. Este fator pode ser uma forma de recuperação agradável, pois tem efeitos psicológicos positivos.

Segundo Minke (2005) uma vista que contemple a natureza previne a depressão e aumenta o rendimento, além de reduzir os gastos públicos com medicamentos.

A partir de uma Pesquisa Nacional de Jardinagem (NGS) voltada às famílias norte-americanas, realizada através de entrevistas em 200 casas, em 50 estados. Foram avaliadas, entre outros quesitos, a importância que as famílias davam as plantas e a jardinagem. Os resultados foram relatados ao NGS, com frequência e porcentagens de respostas de acordo com a amostragem total e nas categorias de dados demográficos específicos.

Dentre os entrevistados, 60% das famílias relacionaram a vegetação com tranquilidade e sossego, 25% disseram que as plantas oferecem sensação de controle sobre o meio ambiente e contribuem para a saúde mental, 40% se sentiram mais calmos e relaxados em contato com vegetação, 46% relataram que a natureza é essencial ao bem-estar (RELF; MCDANIEL; BUTTERFIELD, 1992).

Formação de um microecossistema: Os telhados verdes podem servir como *habitat* e atrair insetos, pássaros, borboletas e outras espécies, promovendo a biodiversidade. Deve-se dar preferência a plantas nativas, já adaptadas ao clima, para restaurar a vitalidade do ecossistema local.

Brenneisen (2006) indica em sua pesquisa que os telhados verdes são parte da estratégia de biodiversidade atual da cidade de Basileia. Nesta cidade será obrigatório o uso de telhados verdes em edifícios novos que tenham telhados planos. Esta medida objetiva a criação de diferentes *habitats* de animais e plantas nos telhados verdes. O autor relata que, estudos em Zurique, Suíça, mostraram os benefícios que os telhados verdes podem proporcionar às espécies localmente e regionalmente ameaçadas de extinção.

Aumento de áreas verdes: Os telhados verdes podem amenizar os impactos do desenvolvimento urbano e ampliar as áreas de vegetação das cidades (BALLARD *et al.*, 2015). A redução das áreas verdes é um tema preocupante e muito discutido na elaboração de planos diretores, justificando a necessidade de adequação ambiental nas cidades. O objetivo é evitar o consumo excessivo dos recursos naturais, reduzir os custos com energia e tratamento de resíduos, recuperar o meio e reabilitar espaços. A disponibilização de áreas verdes e abertas aumenta a oportunidade para a interação social e melhora a construção social (VIDMAR; KELLEY; BERGHAGE, 2007).

3.4.1.1 Benefícios hidrológicos

Devido ao crescimento populacional, a superfície do terreno é constantemente manipulada para atender as necessidades oriundas da urbanização. A partir dessa alteração no solo natural, a impermeabilização deixa consequências no meio urbano. Segundo Minke (2005) alguns exemplos podem ser mensurados como: a contaminação das águas pluviais, entupimento das galerias, aumento da temperatura da água escoada, inundações, erosão dos solos, redução dos níveis freáticos locais. Para minimizar estes problemas a fim de não expandir a infraestrutura de drenagem urbana e causar maiores danos ambientais, pesquisadores indicam soluções ecológicas e de baixo custo, que acabam beneficiando o meio em outros fatores.

Um dos benefícios mais significativos dos telhados verdes é a sua capacidade de reduzir o escoamento superficial. Este fator está diretamente ligado ao aumento de áreas permeáveis urbanas, utilizando a superfície livre das coberturas das edificações para compensar a falta de áreas verdes, aumentando a infiltração da água da chuva, auxiliando na drenagem, mitigando os problemas urbanos (LIESCHEIDT, 2011). Vários estudos quantificam a sua influência na diminuição de picos de cheia (DARAIA; REDA, 2017; KOLB, 2003; MENTENS; RAES; HERMY, 2006; PALLA; GNECCO; LANZA, 2010; STOVIN; POE; BERRETTA, 2013; STOVIN; VESUVIANO; KASMIN, 2012).

O telhado verde é um exemplo de sistema de drenagem sustentável que beneficia dois processos hídricos, sendo um deles a retenção, influenciado pela porosidade e condutividade hidráulica; e a detenção, que ocorre em função do tamanho dos poros que libera a água, isto é, se trata de um armazenamento transitório da precipitação através das camadas do telhado (DE-VILLE *et al.*, 2017). Grande parte da precipitação é interceptada pelas camadas ou vegetação e, naturalmente, se evapora a partir da superfície do solo ou é libertado pela atmosfera pela evapotranspiração (GETTER; ROWE; ANDRESEN, 2007).

A figura 7 ilustra a diferença entre o balanço hídrico de um telhado verde e de um telhado tradicional.

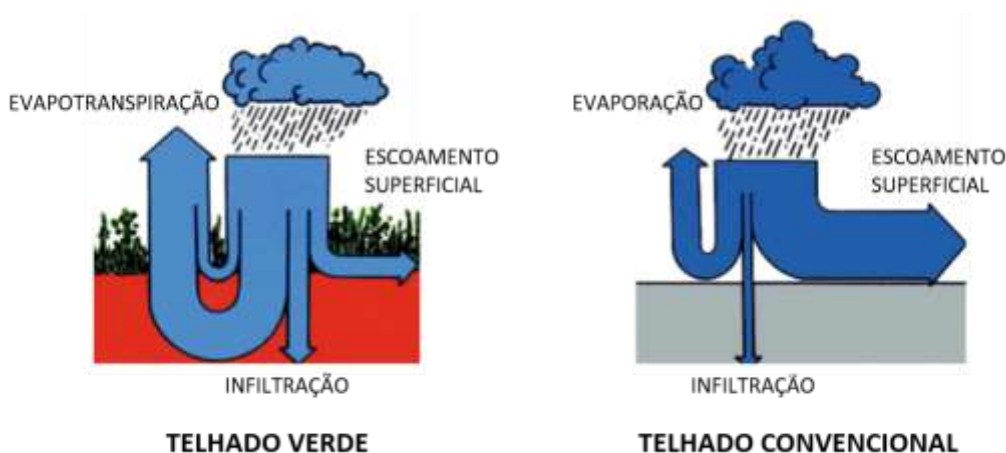


Figura 7 – Balanço hídrico entre um telhado verde e um telhado convencional.
Fonte: Adaptado de Scholz-Barth (2001)

Mentens, Raes e Hermy (2006) explicam que a redução do pico de escoamento superficial, consiste no atraso do tempo inicial do escoamento devido à absorção de água no sistema de telhado verde, reduzindo o escoamento total em função da retenção de parte da precipitação e posteriormente, através da liberação lenta do excesso de água armazenada nos poros do substrato (figura 8).

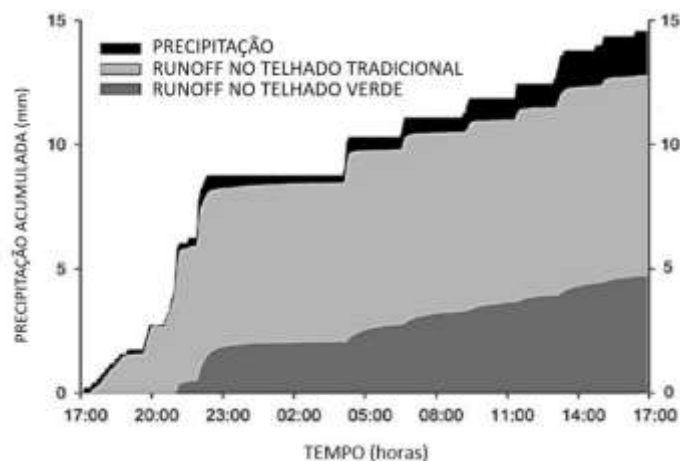


Figura 8 – Escoamento superficial (*runoff*), entre um telhado tradicional e um telhado verde, ambos com inclinação de 20°, durante 24 horas, 14,6 mm de chuva, em abril de 2003.
Fonte: Adaptado de Mentens, Raes e Hermy (2006)

Jobim (2013) destaca que a capacidade de um telhado verde em armazenar a água da chuva dependerá das condições climáticas e do regime das chuvas. Após a saturação

total do substrato, o seu comportamento será de um telhado convencional. Para uma eficiência efetiva do sistema de telhados verdes no escoamento pluvial, será necessário a implantação do sistema em grande escala, como está sendo modelado em Washington DC (EUA), Winnipeg e Toronto (Canada) (WILLES, 2014).

Os telhados verdes sempre que forem designados para amortecimento ou retardo das águas pluviais, devem ser dimensionados para as precipitações máximas. Minke, (2005 *apud* DÜRR, 1995) afirmam que, uma cobertura ajardinada com 20 cm de substrato e argila expandida podem armazenar 90 litros de água por metro quadrado. Kolb (2003) avaliou as condições do escoamento em laje com saibro, telhados verdes extensivos com espessura de 10 cm, telhados verdes intensivos com espessura de 30 cm. Após a saturação do substrato, constatou respectivamente, o amortecimento dos picos de escoamento de 80 a 100%, pico de 75% e pico de 98% para o sistema intensivo.

Os telhados verdes também podem amenizar a temperatura da água e atuar como filtros naturais durante o escoamento. A água com melhor qualidade pode ser despejada no sistema de captação de água pluviais e direcionada aos córregos e rios. Estes afluentes podem manter-se protegidos com a chegada de uma água tratada e com menor intensidade (PECK *et al.*, 1999).

Outro benefício que pode ser integrado às coberturas ajardinadas é o uso da água da chuva. Esta captação pode ser destinada a uma cisterna, onde será armazenada a água retida do telhado e posteriormente, empregada a usos menos nobres para fins não potáveis, como regas de plantas, descarga de vasos sanitários, lavagem de pisos, etc. Esta prática aliviaria o sistema público de drenagem e reduziria o consumo de água (CAMPISANO *et al.*, 2014; MELVILLE-SHREEVE; WARD; BUTLER, 2016; PACHECO *et al.*, 2017; TIEPO *et al.*, 2014).

Para comprovação da eficiência do telhado verde, faz-se necessário a análise de algumas variáveis hidrometeorológicas (TASSI *et al.*, 2014). Tal análise facilita o entendimento do comportamento do telhado verde a partir do ciclo hidrológico, expressas em altura lâmina de água e período de tempo, segundo a equação 5.

$$\frac{ds}{dt} = P - S - ET \quad (5)$$

Onde: $\frac{ds}{dt}$ é o volume escoado superficialmente, P é a precipitação total; S é o armazenamento de água no telhado verde; ET é a saída de água pela evapotranspiração.

Modificando a equação 6 e agrupando as variáveis de entradas e saídas, pode-se escrever genericamente o balanço hídrico no telhado verde como:

$$\Delta S = I - O \quad (6)$$

Onde: ΔS representa o armazenamento de água; I representa as entradas de água no sistema e; O representa as saídas de água do sistema.

A água da chuva retida no substrato e na vegetação ficou sujeita ao processo de evapotranspiração. No entanto, novamente ressalta-se que tal processo não foi considerado na presente pesquisa. Não obstante, após a saturação do substrato, o excedente da chuva escoado superficialmente era encaminhado para os reservatórios.

3.4.1.2 Benefícios térmicos

Para oferecer condições mínimas de abrigo para habitabilidade e reduzir o consumo de energia destinado a climatização dos ambientes internos, a edificação deve atender as exigências e as necessidades dos usuários, sobretudo, estar em conformidade com as questões sustentáveis, visando o menor impacto ambiental.

As coberturas são as grandes responsáveis pela transmissão da carga térmica para dentro das edificações, por estarem mais expostas as ações do clima (insolação, temperatura, ventos, chuvas, umidade do ar). Independentemente da latitude, recebem grande quantidade de calor e reirradiam parte deste calor (ROSPI et al., 2017).

Para fechamento da cobertura há diversos tipos de telhas, sendo que os principais materiais encontrados no mercado são: cerâmica, concreto, fibrocimento, metálica.

As telhas onduladas de fibrocimento são comumente instaladas na maior parte do território nacional em edificações de baixa renda devido seu menor custo, contudo seu desempenho térmico é insuficiente quando comparado com os demais materiais (OLIVEIRA; SOARES; SANTOS, 2016; VITTORINO; SATO; AKUTSU, 2003). Este

tipo de cobertura caracteriza-se por absorver grande parte da radiação solar, aquecem-se e transferem o calor para o interior da edificação (VITTORINO; SATO; AKUTSU, 2003) conseqüentemente, a população fica exposta às intensas variações de temperatura e vulneráveis as doenças decorrentes do clima.

Segundo Abreu et al. (2011):

O material ideal para a telha deve atender às recomendações com as quais a superfície superior tenha alta refletividade solar e alta emissividade térmica e a superfície inferior tenha baixa refletividade solar e baixa emissividade térmica.

As camadas de um telhado verde atuam como isolante térmico da edificação, como uma técnica de regulação da temperatura exterior. No verão diminui a taxa de transferência de calor para o interior, impedido de chegar a superfície e no inverno, diminui a taxa de transferência de calor para o exterior, impedido de escapar (DE-VILLE *et al.*, 2017; WONG *et al.*, 2003b).

Observando a figura 9 pode-se notar as trocas de calor entre telhado verde e telhado de fibrocimento. O esquema do balanço de energia foi realizado pelo Instituto de Física da Universidade Humboldt de Berlim, na Alemanha para uma pesquisa com foco no desenvolvimento urbano ecológico, entre os meses de junho a agosto de 2000.

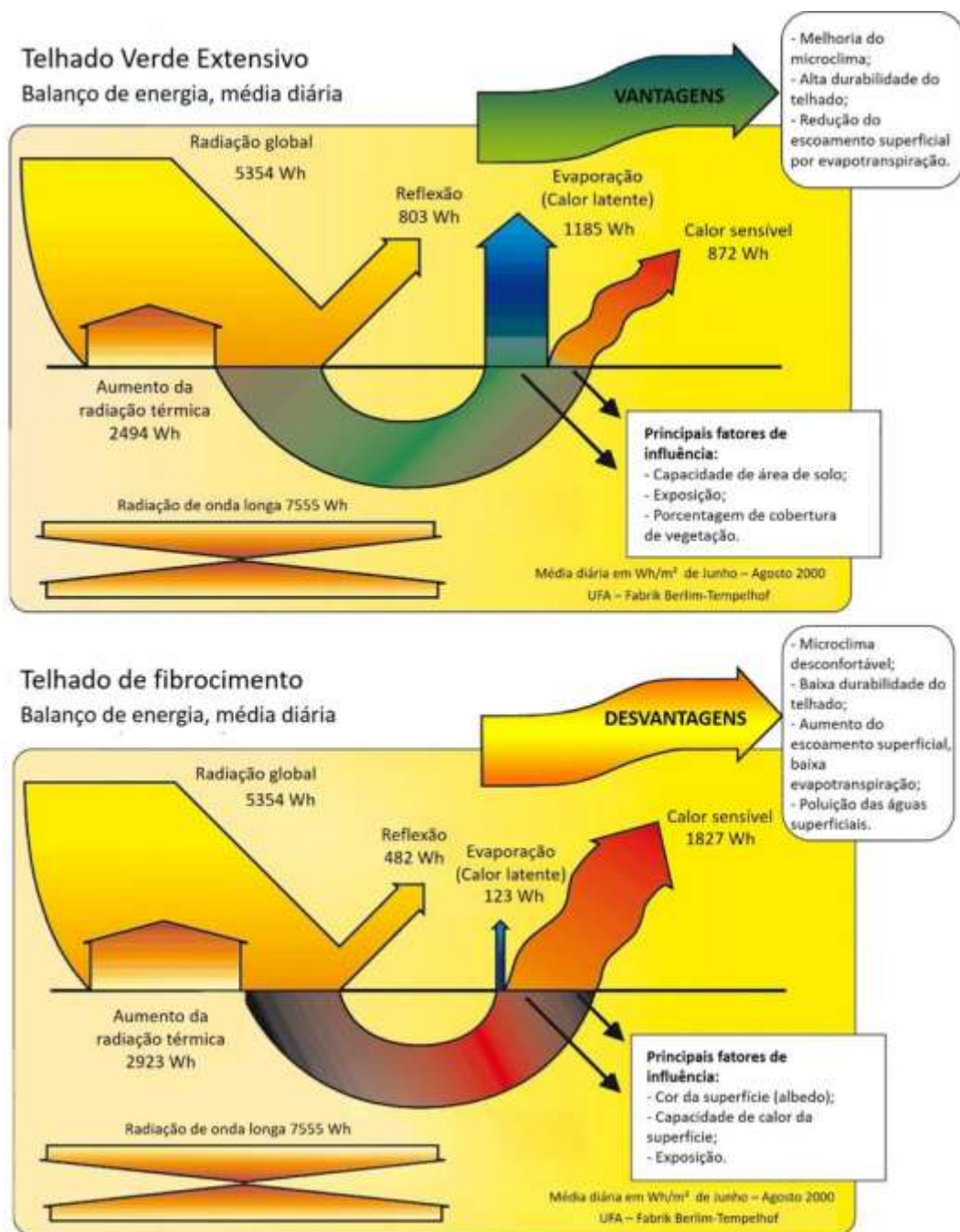


Figura 9 – Representação das trocas de calor de um telhado verde e de um telhado de fibrocimento.

Fonte: *Institute Physics in Berlin* (2012)

Cada vez mais busca-se por sistemas de paredes e coberturas com melhor desempenho aliados à materiais de maior inércia térmica. Costa, Paschoalin Filho e Leite (2017) explicam que a inércia térmica está relacionada à transferência de calor entre o ambiente externo e o interno, favorecendo o atraso da condução do calor por meio do material, diminuindo os picos diários de temperatura.

Quando utilizado sistemas de fechamento com inércia térmica elevada, as diferenças de temperatura do dia são percebidas de forma mais amena na parte interna da edificação e com atraso. Os telhados verdes possuem propriedade isolantes que aumentam a inércia térmica.

Segundo Heywood (2012), 50cm de solo gera um retardo térmico de pelo menos 12 horas. Os responsáveis por atenuar o calor superficial do telhado verde são a fotossíntese, a evapotranspiração das plantas e o substrato (LOPES, 2007).

Na tabela 4, pode-se verificar as comparações de diferentes tipos de cobertura a fim de ilustrar a explicação dada nos parágrafos anteriores.

Tabela 4 – Valores das temperaturas superficiais internas, nos distintos tipos de cobertura analisados, com suas respectivas amplitudes e amortecimento térmicos.

Sistemas de coberturas	Temperaturas superficiais internas		Amplitude térmica (°C)	Amortecimento térmico (°C)
	Máximas (°C)	Mínimas (°C)		
Aço galvanizado	57,8	9,8	48,0	2,3*
Fibrocimento	48,6	9,5	39,1	1,8*
Laje pré-moldada	45,0	11,5	33,5	1,6*
Cerâmica	32,8	12,5	20,3	0,9*
Cobertura verde	26,7	17,5	9,2	0,4*

*O amortecimento térmico não se aplica nesses casos devido à forte influência da radiação solar nestes sistemas de cobertura.

Fonte: Lopes (2007)

As áreas urbanas são uma fonte de emissões de gases de efeito estufa (GEE) (PECK *et al.*, 1999), havendo necessidade de maior demanda do uso de ar condicionado, com o conseqüente aumento o gasto/ produção de energia. Os telhados verdes podem ser eficazes na redução das emissões de GEE por meio de sombreamento direto de edifícios individuais, melhorando o isolamento e reduzindo o efeito de ilha de calor (LI *et al.*, 2018; ROSPI *et al.*, 2017; SUSCA; GAFFIN; DELL'OSSO, 2011; YANG *et al.*, 2016).

Em outras palavras, os telhados verdes podem influenciar o entorno da edificação – água, solo, umidade, vento, vegetação – criando um microclima e também influenciando no clima urbano.

Segundo Minke (2005), a implantação de telhados verdes e jardins poderiam melhorar muito o clima das cidades, através da purificação do ar, redução de pó e variação das temperaturas nos centros urbanos, afirma ainda que a aplicação de telhados verdes em 10% a 20% nas coberturas já garantiria um clima urbano saudável.

3.4.2 Histórico

Os telhados verdes são práticas da construção vernacular¹⁰ utilizadas em vários países há milhares de anos (figura 10). O sistema é conhecido desde a antiguidade por suas camadas atuarem como isolante térmico, ou seja, em climas frios ajudam a reter o calor dentro da edificação, em climas quentes ajudam a impedir a passagem de calor para dentro da edificação (PECK *et al.*, 1999).



Figura 10 – Utilização da arquitetura vernacular em Kassel, Alemanha.
Fonte: Minke (2005)

Os telhados verdes mais antigos do mundo foram os Jardins Suspensos da Babilônia na antiga Mesopotâmia (figura 11). No período Romano e Renascentista, jardim no telhado era principalmente para os ricos. Entre 1600 e 1800, os noruegueses plantavam gramíneas e outras espécies sobre a cobertura de suas casas para protegê-las do vento e da chuva, servindo como isolante natural (GETTER; ROWE, 2006).

¹⁰ Na construção vernacular se emprega materiais e recursos naturais próprios do local em que está inserido. Lamberts, Dutra e Pereira (1997) enfatizam que, nesta técnica, se aproveitam as características desejáveis do clima, enquanto se evitam as indesejáveis.



Figura 11 – Imagem artística dos Jardins Suspensos da Babilônia.
Fonte: *Ancient History Encyclopedia* (2012)

No século XX os arquitetos contemporâneos Le Corbusier e Frank Lloyd Wright fizeram o uso de telhados verdes em diversas obras, seguindo uma filosofia americana *Prairie School* que integra o edifício e a paisagem (PECK *et al.*, 1999).

Em 1960 os telhados verdes foram amplamente difundidos no Norte da Europa, principalmente na Alemanha e Suíça. Este crescimento foi estimulado em grande parte pela legislação estadual e municipal. Uma grande quantidade de pesquisa também foi realizada na tentativa de melhorar o desempenho dos telhados verdes para melhoria da qualidade das águas pluviais e da gestão da quantidade (WONG *et al.*, 2003a).

No Brasil, em 1930 o primeiro telhado verde foi projetado pelo arquiteto Roberto Burle Marx no prédio do Ministério da Educação e Saúde, no Rio de Janeiro, também conhecido como o Palácio Gustavo Capanema (figura 12). O edifício foi projetado por Le Corbusier, Oscar Niemeyer e Lucio Costa (ROLA, 2008).



Figura 12 – Telhado verde do Palácio Gustavo Capanema.
Fonte: Barra (2007)

Atualmente a Alemanha domina o mercado de telhados verdes, segundo Breuning (2008) há em torno de 2 bilhões de metros quadrados de telhados verdes construídos. Os telhados verdes têm basicamente a mesma garantia dada a telhados convencionais, de 30 anos. Dado este incentivo, 7% das coberturas novas implantadas na Alemanha correspondem aos telhados verdes (KÖHLER *et al.*, 2002).

A partir da evolução da tecnologia de telhados verdes, novas técnicas foram desenvolvidas para a implantação do sistema. Segundo Carter e Keeler (2008), Köhler (2005) e Liescheidt (2011) existem dois tipos principais de sistemas de telhados verdes: intensivo e extensivo, os quais são descritos a seguir.

3.4.3 Tipos de telhado verde

O telhado verde pode ser classificado segundo o seu uso, a espessura do substrato, o tipo de vegetação, nível de manutenção e execução (BIANCHINI; HEWAGE, 2012). A partir destes dados deve-se dimensionar a estrutura da edificação conforme a carga prevista do sistema adotado sobre a cobertura.

3.4.3.1 Telhado verde extensivo

Os telhados verdes extensivos são caracterizados pelo plantio de vegetação de pequeno porte como *Sedums*, gramíneas, ervas e plantas herbáceas (GREEN ROOF TECHNOLOGY, 2006), ou seja, plantas resistentes que não necessitam de cuidado e manutenção constantes. Geralmente, o sistema extensivo não necessita de irrigação permanente, salvo em períodos de seca. Segundo Peck *et al.* (1999) a profundidade do solo varia entre 5 e 15 cm. Em relação a carga superficial deste sistema, pode variar de 72,6 a 169,4 Kg por m².

Os usos deste tipo de telhado verde são para fins de conforto térmico (MUSY; MALYS; INARD, 2017; WILKINSON *et al.*, 2017; WONG *et al.*, 2003a), redução do escoamento das águas pluviais (PALLA; GNECCO; LANZA, 2010; STOVIN; POE; BERRETTA, 2013; STOVIN; VESUVIANO; KASMIN, 2012), e efeito estético. Geralmente são coberturas baixas ou de difícil acesso.

A composição deste sistema pode ser verificada na figura 13.

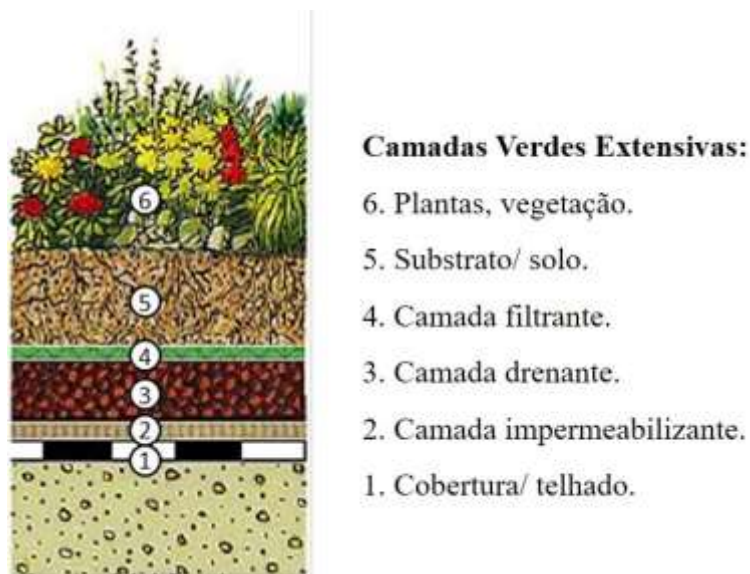


Figura 13 – Composição de um telhado verde extensivo.

Fonte: Green roof technology (2006)

Um exemplo da aplicação do sistema extensivo pode ser visualizado na figura 14.



Figura 14 – Telhado verde extensivo sobre residência, Curitiba.

Nagase e Dunnett (2012) investigaram a influência de três espécies de plantas geralmente utilizadas em sistema de telhados verdes extensivos: *Sedum*, herbáceas e gramíneas. Os autores compararam as diferentes espécies quanto a redução do escoamento de águas pluviais. Doze plantas destas referidas espécies foram plantadas sobre uma bancada com três repetições para cada tipo de vegetação, resultando em um total de 48 plantas. Uma bancada tratava-se das espécies cultivadas em monoculturas, a segunda bancada continha três misturas de *Sedum*, herbáceas e gramíneas, a terceira bancada combinava as doze espécies.

O experimento foi realizado em uma estufa, para manter o volume e a intensidade da chuva simulada constantes. As espécies de gramíneas foram as mais eficazes na redução do escoamento da água, seguidos pelas herbáceas e *Sedum*. Quanto as misturas das quatro espécies, a mistura de grama foi a mais eficaz. Na mistura das doze espécies não houve diferença significativa na quantidade de escoamento da água. Os autores afirmam que a altura das plantas também influencia na redução do escoamento, sendo que as plantas de maior altura e diâmetro são as mais eficazes.

As pesquisas de Lin *et al.* (2013) abordaram telhados extensivos em áreas urbanas de Taipei e Chiayi, China. Para investigar a eficiência térmica dos telhados verdes sob diferentes condições climáticas, foram medidos a temperatura externa do módulo, a

temperatura de referência exterior, a temperatura interior do módulo e a temperatura de referência interna. Para a medição de temperatura foram utilizados fios de termopares tipo T. Os telhados foram monitorados continuamente e de forma sincronizada entre os meses de fevereiro a dezembro de 2011.

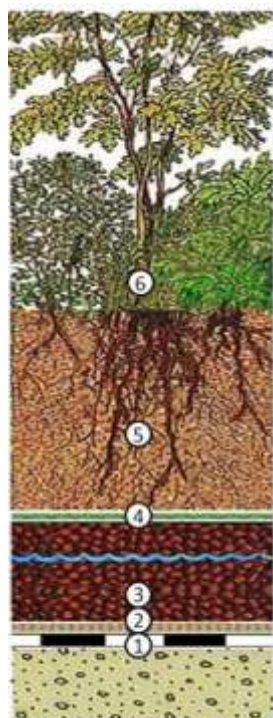
De acordo com a pesquisa, durante o dia, os telhados verdes reduziram a temperatura em 42%, e a temperatura interna em 8%. Durante a noite, os telhados verdes puderam manter 17% da temperatura do ambiente externo. A eficácia diminuiu em dias chuvosos, de 42% para 28% e a temperatura interna de 8% caiu para 4%. Quanto a eficácia de isolamento exterior do telhado verde reduz de 17% para 13%. Nos dias chuvosos mesmo apresentando redução de desempenho, os telhados verdes continuam tendo valores muito significativos no arrefecimento da cobertura.

3.4.3.2 Telhado verde intensivo

Os espaços verdes do sistema intensivo são como um jardim tradicional, permitem plantas diversificadas de grande porte como árvores e arbustos (GETTER; ROWE, 2006) podendo desenvolver um ecossistema complexo. Este sistema requer manutenção e irrigação constantes, além da necessidade de maiores cuidados com a drenagem e impermeabilização (JOBIM, 2013). A profundidade do solo varia entre 20 e 60cm. A carga sobre a estrutura da edificação resulta em um aumento de peso de 290 a 967,7 Kg por m², elevando o custo da implantação. Coberturas intensivas permitem acesso e utilização de pessoas, podendo incluir percursos, áreas de interação social e lazer (PECK *et al.*, 1999).

Devido ao grande volume de substrato necessário para o desenvolvimento das plantas, o telhado verde intensivo apresenta uma redução maior do escoamento superficial em relação ao sistema extensivo (SAVI, 2015).

A figura 15 mostra a composição do sistema intensivo:



Camadas Verdes Intensivas:

6. Plantas, vegetação.
5. Substrato/ solo.
4. Camada filtrante.
3. Camada drenante.
2. Camada impermeabilizante.
1. Cobertura/ telhado.

Figura 15 – Composição de um telhado verde intensivo.
Fonte: Green roof technology (2006)

A seguir na figura 16 pode ser observado o sistema intensivo executado sobre uma edificação.



Figura 16 – Telhado verde intensivo, cobertura do edifício da Fundação Cásper Líbero, São Paulo.

Saadatian *et al.* (2013) relatam um estudo que realizaram em Cingapura sobre os impactos térmicos em um sistema de telhados verdes intensivos em clima tropical. Foram considerados os efeitos dos tipos das plantas utilizadas e a influência da área foliar nas reduções de temperatura da superfície. Seis espécies de plantas com diferentes índices de área foliar foram utilizadas para investigação: *Heliconia*, *Lirio da aranha*, *Ophiopogon*, *Raphis plama*, *Pandanus* e *Erythrina*; comparados com superfícies impermeáveis e solos expostos. Através da pesquisa foi revelado que vegetações mais densas como *Pandanus*, *Lirio da aranha* e *Raphis* palma causaram mais sombreamento, desta forma, a temperatura abaixo deles foi inferior.

A temperatura máxima da superfície impermeável atingiu 57°C, enquanto que a temperatura máxima dos solos expostos atingiu 42°C. Não obstante, a temperatura máxima dos espaços com plantas atingiu 36°C.

Speak *et al.* (2013) estudaram a capacidade de retenção de chuvas em um telhado verde intensivo na cidade de Manchester em relação a um telhado convencional. Para a pesquisa, ambos os telhados foram escolhidos no campus da Universidade de Manchester, sendo o telhado convencional de 900m² e telhado verde com 408m² de 43 anos de idade. Foram observados 69 eventos de chuvas. Quanto aos resultados, o telhado verde apresentou retenção média de 65,7% enquanto no telhado exposto 33,6%.

Os autores apontaram a pesquisa feita por Mentens, Raes e Hermy (2006), onde a mediana de retenção dos telhados verdes intensivos apresentou 75%, e explicam que o valor menor é devido ao nível de saturação do substrato, pelo fato do verão ser muito chuvoso, diminuindo a eficiência de retenção.

3.4.4 Composição geral

O telhado verde é composto basicamente por uma camada impermeabilizante, um sistema de drenagem, camada filtrante, substrato e vegetação (figura 17) (LIU, 2004). A correta disposição das camadas irá assegurar o bom funcionamento da cobertura.

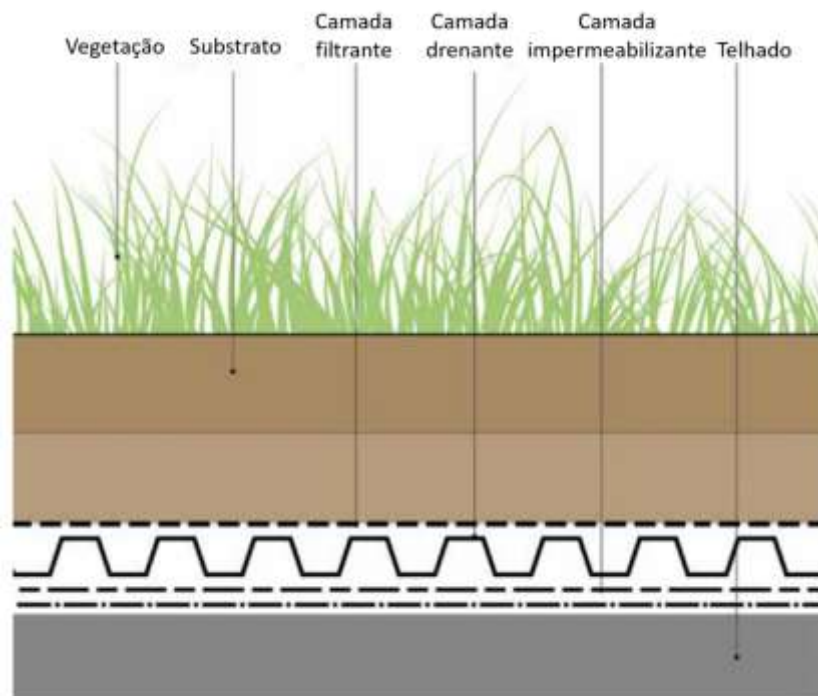


Figura 17 – Camadas de um telhado verde.
Fonte: Adaptado de Ballard *et al.* (2015)

Com base em Liu (2004), Ballard *et al.* (2015) e Scholz-Barth (2001), será apresentada a seguir a estrutura básica adotada no sistema construtivo dos telhados verdes:

1. Telhado: Elemento onde devem ser consideradas as cargas permanentes do sistema adotado, ou seja, o peso de todas as camadas do telhado verde, além do substrato saturado de água.
2. Camada impermeabilizante: A impermeabilização é responsável pela durabilidade do telhado verde (JOBIM, 2013). A função é proteger a base do telhado do contato da água, evitando infiltrações. A escolha do material impermeável vai depender do tipo da superfície adotada. Podem ser utilizadas mantas, membranas, resinas.
3. Camada drenante: Tem como função escoar o excesso de água no solo. Pode ser constituída de argila expandida, brita ou seixos, que facilitem a percolação da água até o dreno.
4. Camada filtrante: Esta camada separa o substrato e a vegetação da camada drenante. É responsável por filtrar a água, evitando que a água das chuvas e regas

arrastem as partículas de solo do telhado verde causando entupimento dos drenos. Utiliza-se normalmente uma manta geotêxtil.

5. Solo: Substrato é a base do telhado verde. Sua função é propiciar um meio de fixação e desenvolvimento das plantas (JOBIM, 2013). Deve ser orgânico com boa composição mineral de nutrientes, com drenagem adequada para facilitar o escoamento do excesso das águas pluviais. A espessura varia de acordo com o porte das plantas, quanto maior for as plantas maior será a profundidade do solo.
6. Vegetação: É a camada superficial de um telhado verde. As plantas devem ser selecionadas pela sua capacidade de adaptação do clima local, sendo a escolha da vegetação um dos fatores mais importantes para adquirir uma boa eficiência do telhado verde. Além da escolha de espécies vegetais resistentes e substrato adequada a elas, um sistema de irrigação pode ser necessário.

Quanto a instalação dos telhados verdes, Wilkinson *et al.* (2017) orientam a não adequação estrutural existente para receber o sistema, pois muitos edifícios não foram projetados para suportar cargas extras. Saadatian *et al.* (2013) comentam que a questão do aumento da carga é um obstáculo a ser considerado, porém o sistema extensivo pode ser mais facilmente adaptado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O quarto capítulo trata da metodologia utilizada na pesquisa, com a caracterização da área de estudo, localização do experimento, delineamento experimental adotado, apresentação do projeto da bancada experimental, as etapas do sistema construtivo do experimento, os métodos utilizados para coleta de dados, estimativa de resistência e transmitância térmica das coberturas e análise estatística.

4.1 Área de estudo

O município de Dois Vizinhos localiza-se à Sudoeste do estado do Paraná (figura 18), à $25^{\circ}44'5''$ S e $53^{\circ}3'31''$ W na microrregião de Francisco Beltrão, pertence ao domínio do Terceiro Planalto Paranaense.

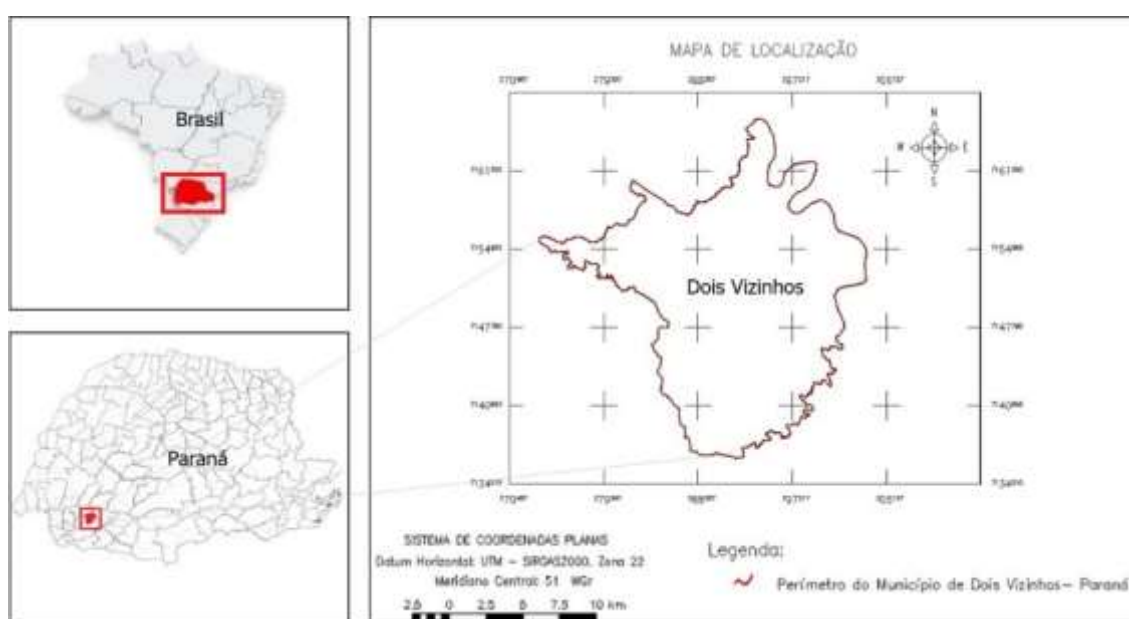


Figura 18 – Localização do Brasil, com destaque para o estado do Paraná e o município de Dois Vizinhos.

Dois Vizinhos pertence a zona bioclimática 2 (figura 19). Na NBR 15220-3 (ABNT, 2003b) são indicadas as diretrizes construtivas relacionadas às estratégias de condicionamento térmico passivo quanto a aberturas, paredes e coberturas para esta zona.

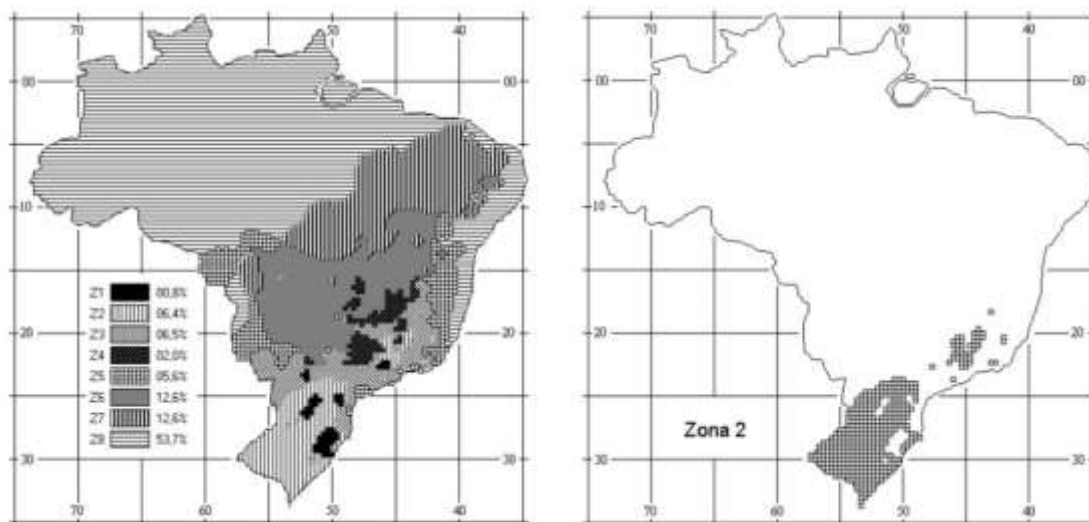


Figura 19 – Zoneamento bioclimático brasileiro e destaque para a zona bioclimática 2.

Fonte: ABNT, 2003b

O clima da região pela classificação Köppen é o tipo Cfa, subtropical úmido, caracterizado por chuvas bem distribuídas durante o ano e verões quentes. As temperaturas variam de 18°C a 22°C. Os ventos predominantes na região são sul.

A precipitação média mensal é de 100mm a 170mm (ALVARES et al., 2013). Segundo a pesquisa de Rankrape (et al., 2015), o mês mais chuvoso na média histórica entre os anos de 2007 a 2014 foi outubro totalizando 218,3 mm. O mês com menor precipitação foi agosto com 101,5 mm.

Da média histórica de temperatura, a maior temperatura em Dois Vizinhos foi 23,8° em fevereiro. O mês que apresentou menor temperatura média foi junho com 15,4°. Quanto ao mês que apresentou maior evapotranspiração potencial foi janeiro com 122,3 mm. O mês com menor evapotranspiração potencial foi junho 20,5 mm (RANKRAPE et al., 2015).

4.2 Localização do experimento

Os módulos experimentais foram construídos em área cedida pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (figura 20), Campus Dois Vizinhos. O local destinado à execução é amplo e sem interferência de sombreamento nos horários determinados para as coletas de dados e está exposto aos eventos de chuvas e passagem dos ventos.

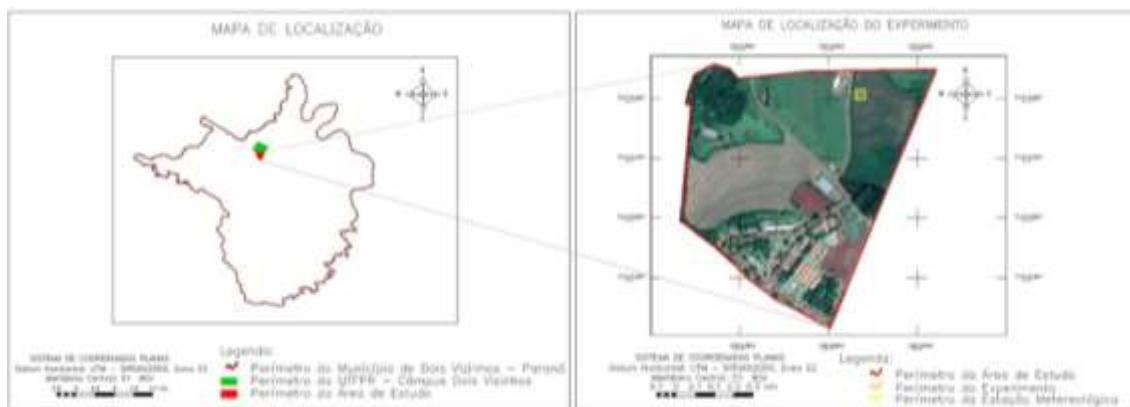


Figura 20 – Localização do Brasil, com destaque para o estado do Paraná e o município de Dois Vizinhos e local de implantação da bancada experimental.

Os parâmetros climáticos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, direção e velocidade do vento, radiação solar) foram obtidos através da estação meteorológica automática Dois Vizinhos (A843) (figura 21). Está situada a $25^{\circ}69'S$, $53^{\circ}09'W$ e distante aproximadamente 662 metros do local onde foi instalada a bancada experimental.



Figura 21 – Estação Meteorológica A843.
Fonte: INMET (2018)

A estação meteorológica faz parte da rede monitorada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e disponibiliza em tempo real, via *internet*, as informações climatológicas de várias regiões do país.

Os módulos de telhados verdes foram determinados ao sistema do tipo extensivo. Optou-se por adotar a Grama Missioneira (*Axonopus* sp), um tipo de forração existente no local, por esta espécie estar adaptada ao clima, pela facilidade de implantação sobre as coberturas leves e ser de pouca manutenção.

4.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado (DIC), ou seja, as unidades experimentais submetidas a cada tratamento são escolhidas completamente ao acaso (SOUZA *et al.*, 2002) por sorteio, para se evitar que um determinado tratamento venha a ser favorecido em relação aos demais.

O experimento é composto por três tratamentos com três repetições, a fim de submeter os resultados a uma análise de variância, o que gerou 9 módulos. Estatisticamente, as repetições servem para aumentar a precisão dos dados experimentais coletados (SILVA, 2006).

Os módulos foram locados lado a lado em uma mesma estrutura, a fim de se obter as mesmas condições climáticas incidindo sobre eles. A estrutura compositiva utilizada para análise dos dados: base (módulo), impermeabilização, telhado, argila expandida, manta bidim, substrato e grama.

4.4 Projeto da bancada experimental

Foi utilizado como referência para este experimento o trabalho de Savi (2015), seguindo o mesmo método construtivo e a forma de coleta da água da chuva para posterior medição.

O protótipo foi construído conforme o projeto arquitetônico apresentado nas figuras 22, 23 e 24. As dimensões da bancada são de 2,14 x 4,03 m. Conforme mostra a planta baixa, sobre o tampo de compensado naval foram dispostos 10 módulos, sendo 3 repetições de telhado verde, 3 repetições de telhado sombreado com argila expandida, e 3 repetições de telhado exposto. Nove módulos foram cobertos com telha de fibrocimento, no entanto, diferentes camadas de materiais foram aplicadas sobre o telhado. O último módulo serviu de referência para o controle. Os números dentro dos módulos na planta baixa correspondem à ordem do sorteio e a distribuição dos mesmos sobre a bancada.



Figura 22 – Planta baixa do protótipo.

Na figura 23 é apresentado o corte esquemático do experimento, mostrando os materiais utilizados.

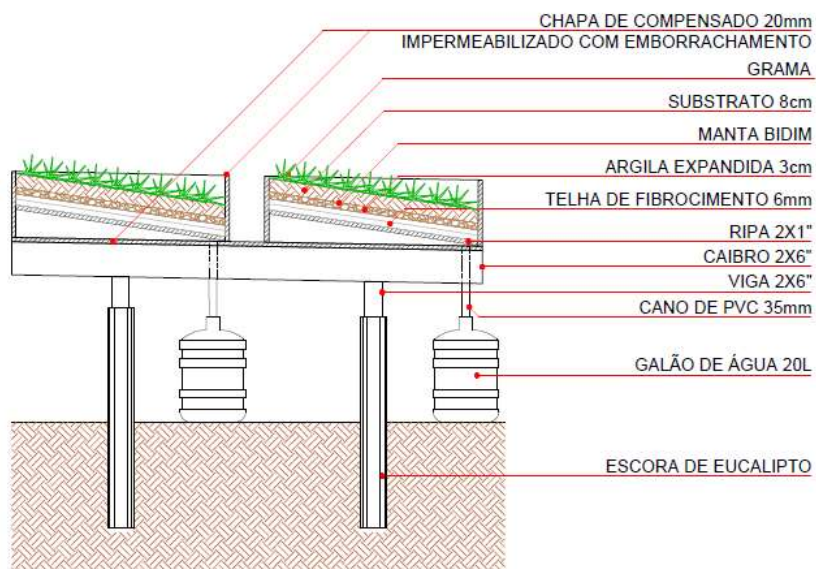


Figura 23 – Corte esquemático.

Para melhor entendimento, a modelagem do protótipo é mostrada na figura 24.



Figura 24 – Modelagem do protótipo.

4.5 Implantação do experimento

A construção da bancada experimental foi iniciada no dia 31 de outubro de 2017.

Dez escoras de eucalipto serviram de base estrutural para o protótipo. Para facilitar a drenagem do escoamento pluvial dentro dos módulos, foi considerada uma inclinação de 2% nas escoras. Duas vigas de pinheiro (2x6"/4 metros) foram fixadas sobre as escoras e posteriormente, seis caibros (2x6"/2 metros) foram intercalados a uma distância de 75 cm entre eles, conforme mostram a figura 25.



Figura 25 – Fixação das vigas e caibros.

As chapas de compensado de 20 mm (2,44 x 1,22 m) foram distribuídas servindo como base para a bancada. Na sequência, iniciou-se a confecção dos dez módulos de 0,99 x 0,79 m, área de 0,78 m². A altura das laterais de 0,30 m teve como finalidade conter as camadas do telhado verde. Entre cada módulo foi colocado poliestireno expandido (EPS) de 20 mm para garantir o isolamento interno e reduzir a interferência térmica entre eles (figura 26).



Figura 26 – Disposição das chapas de compensado e confecção dos módulos.

Em todas as unidades experimentais foram instalados drenos na extremidade inferior da chapa (figura 27). A bitola utilizada para a perfuração da chapa para a saída da água foi de 35 mm. Deste modo, esta etapa foi finalizada com os módulos devidamente

instalados e a colocação dos canos de PVC nos drenos, por onde todo o excedente da água da chuva é escoada e depositada em um reservatório de 20 L.

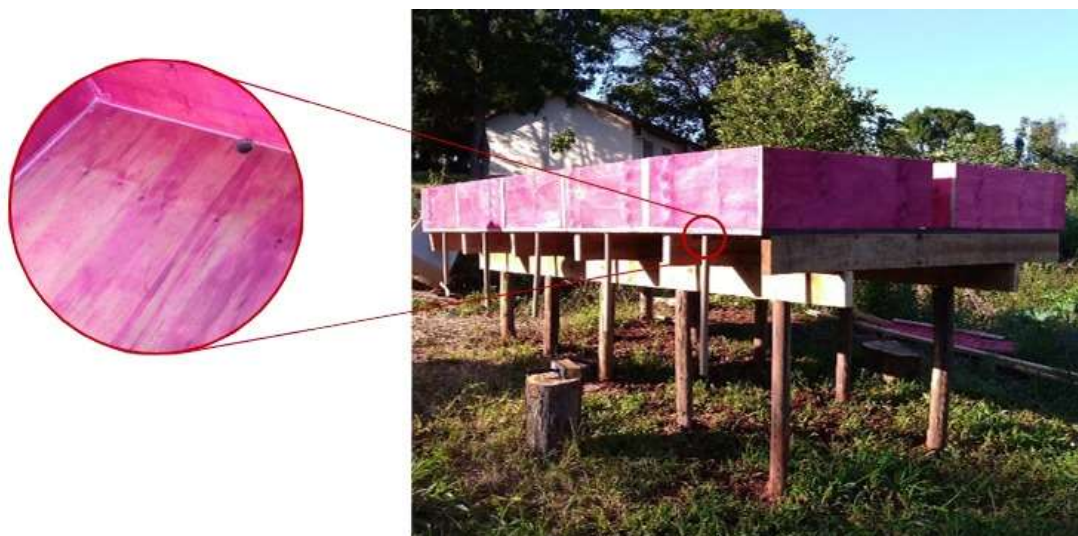


Figura 27 – Módulos isolados e canos colocados.

Com os módulos prontos, iniciou-se o processo de impermeabilização, etapa necessária e fundamental para o sucesso do sistema dos telhados experimentais. Para vedação dos encaixes foi utilizado silicone branco, após secagem, foram aplicadas 3 demãos do emborrachamento líquido.

Sobre a bancada foram dispostos dez módulos (figura 28), nove deles receberam telhas de fibrocimento (sem amianto) de 6 mm, inclinação de 13%.



Figura 28 – Colocação das telhas de fibrocimento.

A figura 29 está relacionada à camada drenante, e o material utilizado para este fim foi a argila expandida (tipo 3222 – graúda). Foi usado um saco de 50 litros para cada módulo de telhado sombreado e telhado verde.



Figura 29 – Argila expandida.

Após o término da execução dos telhados de fibrocimento e dos telhados sombreados, se colocou a manta bidim nos módulos que irão receber os telhados verdes (figura 30). A manta será responsável por filtrar a água da chuva, garantir a permanência do substrato, para que este não cause entupimento nos drenos.



Figura 30 – Preparo para receber os telhados verdes.

Para garantir um bom desenvolvimento da vegetação, foi incorporado junto a terra, adubo e vermiculita fina. A vermiculita deixa o substrato mais leve e facilita a percolação da água para o dreno. Foi estipulado 8 cm de substrato para os telhados verdes (figura 31). A vegetação escolhida para o telhado verde, foi uma gramínea já cultivada

como forração na área instalada do experimento, trata-se de uma Grama Missioneira (*Axonopus* sp).



Figura 31 – Colocação do substrato.

Em cada unidade experimental foi prevista uma saída de água para drenagem do sistema, ligado a um galão de 20 litros para a coleta e leitura da água da chuva (figura 32).



Figura 32 – Bancada experimental finalizada.

O experimento foi finalizado dia 08 de novembro de 2017, neste período foram realizadas algumas coletas para testar e calibrar os telhados. No início de fevereiro, foi observado que em alguns módulos infiltravam água pelas emendas, notando que o material utilizado para impermeabilização, o emborrachamento, não tinha sido eficaz para

tal finalidade. Desta forma, no dia 16 de fevereiro, optou-se por revestir todas as unidades com tecido laminado branco (cortina avícola) com espessura de 137g/m², a fim de criar um bolsão e evitar que a água infiltre, como mostra a figura 33.



Figura 33 – Protótipo revestido.

Após a resolução do problema, foi retornado às coletas de água da chuva dos galões, para quantificar a redução/retenção do escoamento superficial nos diferentes tipos de telhados.

4.6 Método para a coleta de dados

No decorrer da pesquisa foram coletados dois dados distintos: volume de água que seria escoado superficialmente, temperatura superficial externa e temperatura superficial inferior.

As coletas referentes ao escoamento superficial foram realizadas por evento de chuva, ou seja, no início da chuva os galões eram colocados e após o término da mesma, eram retirados para a leitura. Os galões foram submetidos a medição com uma proveta de 1000 ml. Posteriormente, o volume medido era convertido para milímetros. Se levou em consideração apenas a precipitação do evento de chuva e o volume escoado superficialmente para os galões. A evapotranspiração e a saturação do substrato, não foram quantificados na presente pesquisa.

As leituras efetuadas nos galões para cada evento de chuva, referem-se a 25 eventos entre o mês de dezembro de 2017 a novembro de 2018 em chuvas de até 19,4 mm. Os eventos em que ocorreu transbordamento dos galões foram descartados e não considerados.

Para a avaliação do desempenho térmico dos diferentes tipos de telhados, é realizada a medição da temperatura superficial inferior (chapa de compensado) e externa (diferentes superfícies) de cada módulo de telhado. O instrumento utilizado para a medição é o Termômetro Infravermelho Icel - TD-955 (figura 34). Foi estipulado uma distância padrão de 50cm para a medição das superfícies, pois o equipamento sofre variação à medida que se aproxima ou se afasta do foco.



Figura 34 – Termômetro para medição da temperatura superficial.

As coletas de temperatura ocorreram nas estações do outono, inverno e primavera. A investigação em estações distintas foi para avaliar se havia diferença na eficiência dos tratamentos.

Para avaliar as condições de conforto térmico, a medição foi efetuada em três dias consecutivos, com intervalos de medição de quinze dias. Os horários estipulados para medição da temperatura foram: às 7h00 – devido a cobertura estar no processo de aquecimento passivo; às 12h00 – pela exposição máxima da cobertura à radiação solar; e às 18h00 – pela cobertura estar no processo de resfriamento passivo.

As temperaturas superficiais inferiores medidas, não necessariamente, representam as temperaturas dentro de ambientes submetidos a tais coberturas, pois trata-se de uma bancada experimental com todos os tratamentos dispostos juntos. A intenção é demonstrar o desempenho térmico entre as diferentes coberturas e não simular um ambiente interno.

4.7 Estimativa de resistência e transmitância térmica do experimento

Para estimar a resistência térmica (R) dos diferentes tratamentos do experimento foram utilizados dados de condutividade térmica (λ) conforme a NBR 15.220-2 (ABNT, 2003a) e Frota e Schiffer (2001). Desta maneira foi possível calcular separadamente a resistência térmica de cada componente das camadas adotadas nos módulos utilizando a equação 2. O valor da resistência térmica total (R_t) de cada módulo foi obtido através da equação 3. Em seguida, ao utilizar a equação 4 foi possível estimar a transmitância térmica (U) de cada tratamento.

4.8 Análise estatística

Para analisar os resultados de escoamento superficial coletados dos módulos experimentais, os valores obtidos das medições de cada módulo foram divididos por tipos de tratamento e então submetidos a uma equação de média aritmética simples. O objetivo foi obter um único valor para cada tratamento por evento.

Para analisar os resultados de temperatura superficial externa e inferior coletados, os dados foram separados por horários e tratamentos distintos. Foram submetidos a uma equação de média aritmética simples para obter um único valor de horário e tratamento, as coletas foram divididas por estações.

Os dados de escoamento superficial e temperatura obtidos da bancada experimental foram inseridos no *Software R* (versão 3.1.1). A partir deste programa estatístico foi possível analisar, confeccionar os gráficos e discutir os resultados.

Os testes de normalidade aplicados aos dados do coeficiente de retenção e de temperatura externa e inferior foram os testes de Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov (Lilliefors). A homocedasticidade de variâncias foi verificada aplicando o teste de Barlett. Os dados que apresentaram normalidade e homocedasticidade foram analisados pela ANOVA e pelo teste *post-hoc* de Tukey-HSD.

Os valores do coeficiente de retenção e de temperaturas apresentaram normalidade, exceto para a temperatura externa dos tratamentos às 12h do inverno, às 12h da primavera, e a temperatura inferior às 12h da primavera. Para a análise dos dados não normais foi utilizado o teste de Wilcoxon *Rank Sum Test* (teste U Mann-Whitney). Em todos os testes realizados foram considerados o nível de significância de 0,05.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No quinto capítulo são apresentados os dados coletados do experimento, os resultados analisados nas categorias de nível de retenção da água da chuva, cálculos de resistência e transmitância térmica, bem como, compara o desempenho térmico de cada tipo de cobertura.

5.1 Dados de precipitação coletados do experimento

O levantamento de dados buscou informações sobre as características físicas e térmicas das coberturas de telhado verde, argila expandida e fibrocimento diante do clima do município nas estações de outono, inverno e primavera.

A tabela 5 apresenta os dados de precipitação obtidos do módulo controle do experimento nos eventos.

Tabela 5 – Dados de precipitação (mm) do módulo controle (mm) da bancada experimental nos dias de coleta.

Eventos	Data da coleta (dd/mm/aaaa)	Experimento (mm)
1	01/12/2017	8,3
2	16/12/2017	6,3
3	21/02/2018	14,9
4	27/02/2018	4,0
5	15/03/2018	11,5
6	20/03/2018	6,8
7	22/03/2018	19,4
8	27/03/2018	3,6
9	11/05/2018	4,4
10	04/06/2018	2,3
11	05/06/2018	1,5
12	12/06/2018	4,6
13	26/06/2018	15,4
14	28/06/2018	10,0
15	03/08/2018	9,4
16	24/08/2018	14,4
17	31/08/2018	2,2
18	17/09/2018	4,7
19	19/09/2018	3,6
20	17/10/2018	7,0
21	18/10/2018	7,2
22	25/10/2018	18,9
23	31/10/2018	6,6

Tabela 5 – Dados de precipitação (mm) do módulo controle (mm) da bancada experimental nos dias de coleta (continuação).

Eventos	Data da coleta (dd/mm/aaaa)	Experimento (mm)
24	14/11/2018	10,9
25	23/11/2018	9,4

Com os dados da tabela 5 foi possível elaborar a tabela 6 e analisar o escoamento superficial de cada tratamento. A base de comparação entre as coberturas foi o volume escoado do módulo de controle.

Tabela 6 – Retenção do escoamento pluvial (%) coletados nos galões dos respectivos tratamentos.

Eventos	Dias anteriores sem chuva	Retenção do escoamento pluvial (%)	Tratamentos
1	5	98%	Telhado verde
		30%	Argila expandida
		9%	Fibrocimento
		-	Controle
2	9	100%	Telhado verde
		30%	Argila expandida
		-	Fibrocimento
		-	Controle
3	2	19%	Telhado verde
		9%	Argila expandida
		2%	Fibrocimento
		-	Controle
4	6	63%	Telhado verde
		49%	Argila expandida
		6%	Fibrocimento
		-	Controle
5	-	47%	Telhado verde
		21%	Argila expandida
		6%	Fibrocimento
		-	Controle
6	-	76%	Telhado verde
		34%	Argila expandida
		6%	Fibrocimento
		-	Controle
7	-	17%	Telhado verde
		8%	Argila expandida
		3%	Fibrocimento
		-	Controle

Tabela 6 – Retenção do escoamento pluvial (%) coletados nos galões dos respectivos tratamentos (continuação).

Eventos	Dias anteriores sem chuva	Retenção do escoamento pluvial (%)	Tratamentos
8	2	84%	Telhado verde
		43%	Argila expandida
		5%	Fibrocimento
		-	Controle
9	4	95%	Telhado verde
		47%	Argila expandida
		8%	Fibrocimento
		-	Controle
10	2	87%	Telhado verde
		40%	Argila expandida
		8%	Fibrocimento
		-	Controle
11	-	34%	Telhado verde
		2%	Argila expandida
		1%	Fibrocimento
		-	Controle
12	7	88%	Telhado verde
		35%	Argila expandida
		2%	Fibrocimento
		-	Controle
13	-	33%	Telhado verde
		21%	Argila expandida
		10%	Fibrocimento
		-	Controle
14	-	42%	Telhado verde
		17%	Argila expandida
		5%	Fibrocimento
		-	Controle
15	13	84%	Telhado verde
		36%	Argila expandida
		6%	Fibrocimento
		-	Controle
16	2	18%	Telhado verde
		9%	Argila expandida
		2%	Fibrocimento
		-	Controle
17	7	99%	Telhado verde
		92%	Argila expandida
		10%	Fibrocimento
		-	Controle
18	-	52%	Telhado verde
		22%	Argila expandida
		6%	Fibrocimento
		-	Controle

Tabela 6 – Retenção do escoamento pluvial (%) coletados nos galões dos respectivos tratamentos (continuação).

Eventos	Dias antecedentes sem chuva	Retenção do escoamento pluvial (%)	Tratamentos
19	-	89%	Telhado verde
		32%	Argila expandida
		2%	Fibrocimento
		-	Controle
20	1	91%	Telhado verde
		33%	Argila expandida
		6%	Fibrocimento
		-	Controle
21	-	70%	Telhado verde
		35%	Argila expandida
		11%	Fibrocimento
		-	Controle
22	-	38%	Telhado verde
		14%	Argila expandida
		8%	Fibrocimento
		-	Controle
23	3	41%	Telhado verde
		18%	Argila expandida
		7%	Fibrocimento
		-	Controle
24	10	31%	Telhado verde
		7%	Argila expandida
		3%	Fibrocimento
		-	Controle
25	4	99%	Telhado verde
		45%	Argila expandida
		10%	Fibrocimento
		-	Controle

Cada cobertura possui características próprias que podem influenciar ou não na capacidade de absorver a água da chuva.

A quantidade de água retida apresentada na tabela 6, pode ser estimada no processo de evaporação (nos módulos de fibrocimento e argila expandida), evapotranspiração (módulos de telhado verde) e retenção no substrato/argila (respectivamente, nos módulos de telhado verde e argila expandida). Estes fatores não serem abordados na pesquisa.

5.2 Comparações do escoamento pluvial entre os diferentes tipos de cobertura

A figura 35 ilustra o escoamento superficial dos tratamentos analisados em um mês significativo de coleta. Os eventos 1, 2, 3, 4 e 5 correspondem, respectivamente, aos dias 04, 05, 12, 26 e 28 de junho de 2018.

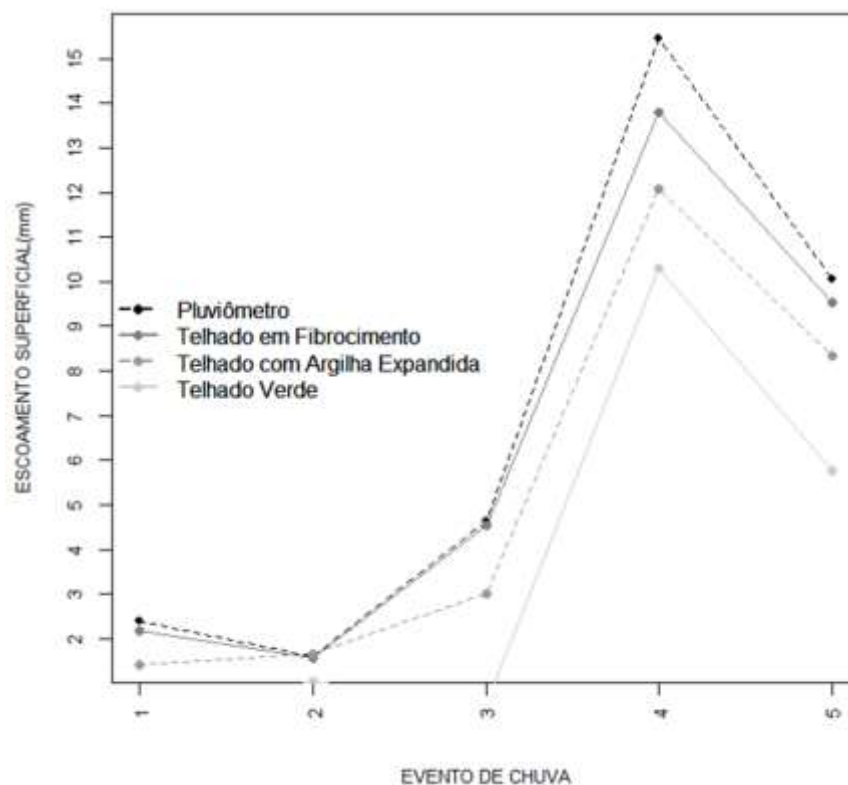


Figura 35 – Escoamento superficial (mm) dos tratamentos analisados em relação ao módulo controle para o mês de junho de 2018.

Nos eventos 1 e 3 da figura 35 pode ser observado que, em chuvas de menor volume e substrato seco, os telhados verdes tiveram 87% de retenção da água que seria escoada superficialmente. A argila expandida apresentou, respectivamente, retenção de 40% e 35% do volume de precipitação. Enquanto os módulos de fibrocimento apresentaram 8% e 2% de retenção em relação ao módulo controle.

No evento 2, os telhados verdes ainda apresentaram eficiência, porém entre os demais tratamentos não houve diferenças significativas.

Em dias consecutivos de chuva, de maior volume como nos eventos 4 (15,4 mm) e 5 (10 mm), mesmo com o solo saturado a eficiência dos telhados verdes ainda é visível com 33% e 42% de retenção. Os módulos com argila expandida apresentaram redução (respectivamente, 21% e 17%) na eficiência de retenção, aproximando-se dos valores dos telhados com fibrocimento.

A tabela 7 apresenta os dados de escoamento superficial, por mês de coleta e por tratamento, nos eventos de precipitação.

Tabela 7 – Água da chuva escoada (mm) nas coberturas por mês de coleta.

Mês	Água da chuva escoada (mm)			
	Controle	Telhado verde	Argila expandida	Fibrocimento
Dezembro/2017	14,69	0,14	10,23	13,93
Fevereiro/2018	19,06	13,6	15,58	18,53
Março/2018	41,52	24,31	33,35	39,06
Mai/2018	4,44	0,21	2,34	4,08
Junho/2018	38,08	17,95	26,48	31,61
Agosto/2018	23,37	12,8	17,57	22,37
Setembro/2018	8,12	2,64	6,16	7,99
Outubro/2018	39,87	18,33	31,03	36,49
Novembro/2018	17,38	7,6	13,69	16,29

Os resultados provenientes do período da pesquisa quanto a comparação de desempenho de retenção do escoamento pluvial entre os três diferentes tratamentos, pode ser observado na figura 36.

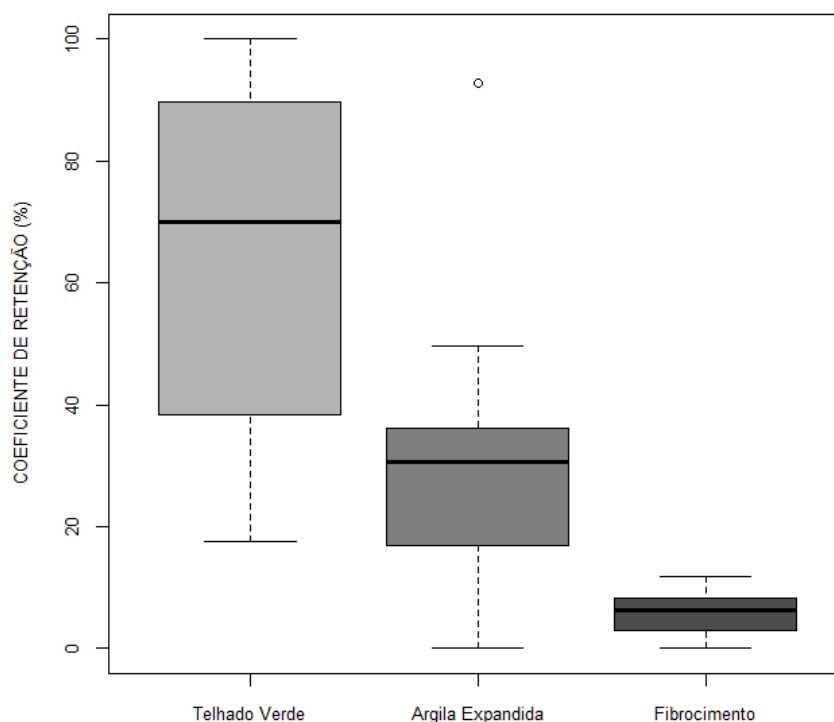


Figura 36 – Coeficiente de retenção (%) do escoamento superficial dos módulos de telhado verde, argila expandida e fibrocimento no período de dezembro/2017 a novembro/2018.

Nos dias coletados em que não houve chuva antecedente registrada (01/12/2017, 16/12/2017, 31/08/2018 e 23/11/2018) os telhados verdes apresentaram retenção de 98 a 100% para chuvas até 9,4 mm. Isso se deve a maior capacidade de armazenamento que os telhados verdes proporcionaram devido ao substrato seco.

A capacidade de retenção mediana dos módulos de telhados verdes indica a efetiva redução do volume de água da chuva que seria escoado superficialmente. Nestas coberturas a chuva foi absorvida e amortecida pelas camadas do telhado verde (grama, substrato, argila expandida).

A grande dispersão dos dados observados nos telhados verdes pode ser explicada em função das diferentes condições antecedentes do substrato aliada às diferentes intensidades da precipitação registradas durante o monitoramento dos módulos experimentais.

Nos dias em que se verificou grande retenção de escoamento dos telhados verdes, as coberturas com argila expandida apresentaram uma retenção de 38%. O *outlier* representado na figura 4 refere-se ao evento do dia 31/08/2018, que corresponde a uma chuva 2,2 mm que resultou em 92% de retenção. A argila expandida apresentou boa capacidade de absorção da água da chuva.

Em 21 dos eventos coletados nas coberturas de fibrocimento tiveram menos de 9% de retenção, ou seja, um grande volume de água seria escoado superficialmente. Essa retenção se deve, parte pela absorção da telha e parte devido ao processo de evaporação da água na superfície aquecida da telha. No dia 16/12/2017 para uma chuva de 6,3 mm toda a água dos módulos escoou superficialmente. Desta forma, verificou-se que esta cobertura apresentou baixa eficiência comparado aos demais tratamentos.

O teste de Wilcoxon mostrou diferenças significativas de capacidade de retenção entre os módulos de telhados verdes e telhas de fibrocimento ($W = 625, p = 1,582 \cdot 10^{-14}$) e entre os módulos com argila expandida ($W = 515, p = 4,141 \cdot 10^{-5}$). O mesmo pôde ser observado entre os módulos com argila expandida e fibrocimento ($W = 51,5, p = 4,314 \cdot 10^{-7}$).

5.3 Desempenho térmico dos módulos experimentais

Para estimar a resistência térmica e a transmitância térmica dos tipos de cobertura utilizadas no experimento foram utilizadas as tabelas a seguir. A tabela 8 trata dos módulos de fibrocimento.

Tabela 8 – Resistência térmica calculada para cada componente da cobertura de fibrocimento.

Material	e (m)	λ (W/ m K)	R (m ² K/W)
Ar na superfície externa	-	-	0,04*
Telha de fibrocimento	0,006	0,80*	0,0075
Chapa de compensado	0,020	0,12*	0,16
Ar na superfície inferior	-	-	0,10*

* Valores adotados da NBR 15.220-2 (ABNT, 2003a).

* Os símbolos na tabela 8 correspondem, respectivamente, à espessura, à condutividade térmica e à resistência térmica dos materiais acima descritos.

A resistência térmica estimada para a cobertura de fibrocimento foi de 0,30 m²K/W. Portanto, o material apresenta baixa resistência térmica, ou seja, possui uma maior capacidade de absorver a temperatura. A transmitância térmica calculada resultou em 3,25 W/m²K. O valor alto de transmitância térmica remete a facilidade da telha de fibrocimento em transferir temperaturas extremas para as camadas adjacentes.

No Brasil as telhas de fibrocimento são largamente utilizadas, ainda que na sua maioria, pela população carente devido ao baixo custo de aquisição. Estas coberturas causam desconforto térmico no interior das edificações, aumentam os custos em razão de maior consumo energético com o uso de resfriadores e aquecedores. Além dos usuários ficarem mais vulneráveis as doenças provenientes do clima. A sua aplicação na escala urbana interfere no microclima aumentando as ilhas de calor e gases de efeito estufa, pois absorvem grande parte da radiação solar incidente e reirradiam este calor para as edificações vizinhas.

Na tabela 9 foram estimados os valores de resistência térmica e de transmitância térmica para os módulos com argila expandida.

Tabela 9 – Resistência térmica calculada para cada componente da cobertura com argila expandida.

Material	e (m)	λ (W/ m K)	R (m ² K/W)
Ar na superfície externa	-	-	0,04*
Argila expandida	0,07	0,16*	0,43
Telha de fibrocimento	0,006	0,80**	0,0075
Chapa de compensado	0,020	0,12*	0,16
Ar na superfície inferior	-	-	0,10*

* Valores adotados da NBR 15.220-2 (ABNT, 2003a).

** Média dos valores apresentados pela NBR 15.220-2 (ABNT, 2003a).

* Os símbolos na tabela 9 correspondem, respectivamente, à espessura, à condutividade térmica e à resistência térmica dos materiais acima descritos.

Para a cobertura com argila expandida a resistência térmica estimada foi 0,73 m²K/W. Pode ser observado que ao adicionar a argila expandida acima da telha de fibrocimento, a resistência térmica deste módulo dobrou. O mesmo pode ser notado em relação a transmitância térmica estimada em 1,35 W/m²K. Este tipo de material possui propriedades térmicas de reter e isolar temperaturas extremas.

Deste modo, pode ser utilizada em edificações como alternativa na redução térmica, pois é um material com propriedades isolantes que minimizam a transferência de temperaturas extremas para as camadas inferiores. Porém o uso da argila em coberturas em grande escala pode proporcionar a formação de ilhas de calor, devido ao superaquecimento do material e este reirradiar o calor para superfícies vizinhas alterando o microclima.

Na tabela abaixo estimou-se a resistência térmica e a transmitância térmica para os módulos com telhado verde.

Tabela 10 – Resistência térmica calculada para cada componente da cobertura com telhado verde.

Material	e (m)	λ (W/ m K)	R (m ² K/W)
Ar na superfície externa	-	-	0,04*
Gramma	0,05	0,032**	1,56
Substrato seco	0,08	0,60***	0,13
Manta geotêxtil	0,002	0,05***	0,04
Argila expandida	0,07	0,16*	0,43
Telha de fibrocimento	0,006	0,80****	0,0075
Chapa de compensado	0,020	0,12*	0,16
Ar na superfície inferior	-	-	0,10*

* Valores adotados da NBR 15.220-2 (ABNT, 2003a)

** Valor adotado da trapoeraba (*Commelina diffusa*) segundo Tavares e Câmara (2017).

*** Valor adotado conforme indicação de Frota e Schiffer (2001).

**** Média dos valores apresentados pela NBR 15.220-2 (ABNT, 2003a).

* Os símbolos na tabela 10 correspondem, respectivamente, à espessura, à condutividade térmica e à resistência térmica dos materiais acima descritos.

No caso das coberturas com telhados verdes a resistência térmica estimada foi 2,46 m²K/W. Este valor corresponde a uma alta resistência térmica, ou seja, o material é resistente quando submetido a extremas temperaturas. É caracterizado por amortecer as temperaturas devido a umidade das plantas e substrato.

A transmitância térmica calculada para os módulos com telhados verdes foi de 0,40 W/m²K. Isto quer dizer que as camadas do telhado verde (plantas, o substrato, a argila) funcionam como um isolante térmico e reduzem a transferência de temperaturas às camadas adjacentes.

Resultado similar foi testado por Vasconcelos (2011), onde o autor avaliou a transmitância térmica de um sistema de telhados verdes sobre laje com membrana alveolar resultando em 0,76 W/m² K. Porém na pesquisa de Weber *et al.* (2017) os autores apresentam a transmitância térmica de 2,18 W/m² K para cobertura com telhado verde e laje maciça, ou seja, valores de transmitância em desacordo com a presente pesquisa e com Vasconcelos (2011).

As coberturas com telhados verdes, ao utilizarem a vegetação, aumentam a refletância da radiação solar e diminuem a temperatura do ar circundante. Conseqüentemente, podem reduzir o consumo de energia elétrica das edificações em função da sua elevada inércia térmica. Por funcionarem como amortecedor térmico, minimizam as grandes variações de temperatura da cobertura durante o dia e a noite, diminuindo as trocas térmicas das coberturas com o meio. Desta forma, protegem a cobertura convencional e podem aumentar a sua vida útil.

De acordo com a zona bioclimática em que o município de Dois Vizinhos está inserido, a NBR 15220 estabelece que as coberturas devam atender as exigências de transmitância térmica menor e/ou igual a 2,30 W/m²K. Ao analisar as tabelas 8, 9 e 10 de cálculos dos tratamentos pesquisados, pode-se observar que os módulos de telhados com argila expandida e telhado verde apresentam a transmitância térmica em conformidade com a norma. As telhas de fibrocimento para as condições locais não atendem as exigências prevista pela NBR 15220.

5.4 Dados de temperatura coletados do experimento

Na tabela 11 são apresentados os dados de temperaturas superficial externa e inferior das nove coberturas analisadas nos dias e horários estipulados para a coleta durante a estação do outono (21 de março à 20 de junho).

Tabela 11 – Dados da temperatura superficial externa (°C) e inferior (°C) das diferentes coberturas no período do outono.

Coleta	Data da coleta (dd/mm/aaaa)	Experimento						Tipos *
		Temp. Sup. Externa (°C)			Temp. Sup. Inferior (°C)			
		7h	12h	18h	7h	12h	18h	
1	22/03/2018	14,1	32,7	27,5	13,9	23,1	29,8	TV
		13,2	49,2	28,6	13,6	24,3	30,0	AE
		12,1	41,5	29,6	14,2	26,2	29,9	FIB
2	23/03/2018	21,1	29,9	18,0	22,5	22,8	22,6	TV
		21,1	34,5	18,5	22,1	23,9	23,1	AE
		21,3	34,5	18,6	21,7	24,2	22,1	FIB
3	26/03/2018	11,6	40,6	16,0	12,4	26,9	19,0	TV
		10,2	55,0	18,7	11,9	28,5	20,2	AE
		9,3	50,7	18,5	11,3	29,3	20,5	FIB
4	11/04/2018	15,5	39,3	10,9	15,2	28,4	11,8	TV
		14,7	60,6	13,9	14,4	29,2	14,2	AE
		13,4	51,6	12,0	14,5	30,2	12,2	FIB
5	12/04/2018	16,6	39,1	16,0	17,2	31,5	18,8	TV
		15,4	62,9	20,2	16,3	31,9	20,8	AE
		14,3	57,8	18,1	15,7	33,7	18,9	FIB
6	13/04/2018	18,9	34,3	16,9	19,6	23,5	16,9	TV
		18,1	58,5	24,2	19,0	24,7	20,5	AE
		17,4	50,6	19,6	18,3	25,9	17,8	FIB
7	30/04/2018	11,7	51,5	19,1	11,8	38,7	19,9	TV
		7,7	71,2	22,1	11,2	44,4	21,7	AE
		4,0	62,3	20,5	10,6	45,4	20,3	FIB
8	01/05/2018	17,3	41,1	17,9	16,6	36,2	19,4	TV
		15,0	53,9	20,6	16,3	38,3	20,6	AE
		14,6	47,4	18,4	15,3	38,6	19,6	FIB
9	02/05/2018	14,4	47,9	7,2	15,0	35,7	15,9	TV
		12,8	64,5	13,2	14,4	39,4	17,4	AE
		12,0	57,5	11,8	14,0	38,3	15,9	FIB
10	21/05/2018	7,6	34,4	4,5	6,6	13,1	1,7	TV
		4,3	45,9	5,2	6,1	12,5	2,4	AE
		5,6	40,7	0,8	5,6	14,4	1,1	FIB
11	22/05/2018	5,2	31,7	2,6	4,8	18,0	4,2	TV
		3,0	43,1	3,2	3,4	18,5	5,4	AE
		1,7	37,4	1,8	3,0	17,5	2,8	FIB
12	23/05/2018	5,5	39,8	4,1	7,2	28,6	0,8	TV
		1,7	53,5	2,6	5,8	29,4	0,6	AE
		1,3	46,6	4,1	5,2	28,7	2,3	FIB
13	06/06/2018	6,3	33,1	5,5	6,5	24,6	6,9	TV
		1,6	41,1	6,1	6,0	25,1	6,7	AE
		1,1	23,6	5,2	5,0	25,3	6,0	FIB
14	07/06/2018	11,5	37,5	4,4	11,2	21,0	4,5	TV
		11,0	49,2	4,5	10,7	21,6	4,0	AE
		11,1	40,9	2,5	10,7	20,8	3,5	FIB
15	08/06/2018	3,8	29,5	2,9	4,3	19,1	2,8	TV
		2,3	43,4	2,2	3,2	19,2	3,2	AE
		1,3	34,4	1,9	2,5	19,1	1,1	FIB
16	20/06/2018	8,6	43,4	12,8	10,0	35,9	13,4	TV
		6,6	55,0	13,3	9,1	36,5	13,7	AE
		5,4	48,2	12,0	8,7	37,7	13,1	FIB

Tabela 11 – Dados da temperatura superficial externa (°C) e inferior (°C) das diferentes coberturas no período do outono (continuação).

Coleta	Data da coleta (dd/mm/aaaa)	Experimento						Tipos *
		Temp. Sup. Externa (°C)			Temp. Sup. Inferior (°C)			
		7h	12h	18h	7h	12h	18h	
17	21/06/2018	12,9	28,6	11,9	13,5	18,8	11,4	TV
		11,9	39,5	12,2	13,2	19,5	12,3	AE
		11,5	34,4	11,3	13,0	20,5	11,0	FIB
18	22/06/2018	11,5	35,7	15,0	10,7	27,0	17,2	TV
		9,8	47,1	16,0	9,7	27,0	17,6	AE
		8,9	40,6	15,8	9,4	27,5	16,8	FIB

*Os tipos de tratamentos analisados na tabela acima referem-se a telhado verde (TV), argila expandida (AE) e fibrocimento (FIB).

Na tabela 12 são apresentados os dados de temperaturas superficial externa e inferior nos dias e horários estipulados para a coleta durante a estação do inverno (21 de junho à 20 de setembro). A intenção é obter uma base para comparativo da temperatura superficial externa e interna coletadas das coberturas.

Tabela 12 – Dados da temperatura superficial externa (°C) e inferior (°C) das diferentes coberturas no período do inverno.

Coleta	Data da coleta (dd/mm/aaa)	Experimento						Tipos *
		Temp. Sup. Externa (°C)			Temp. Sup. Inferior (°C)			
		7h	12h	18h	7h	12h	18h	
1	04/07/2018	8,6	43,8	10,9	10,0	32,3	12,6	TV
		6,6	56,0	11,2	9,1	33,1	12,8	AE
		5,4	50,0	11,2	8,7	33,7	11,8	FIB
2	05/07/2018	14,8	44,7	13,0	15,9	38,2	14,4	TV
		13,9	56,4	14,1	15,6	38,4	15,2	AE
		13,6	48,5	12,9	15,3	39,7	13,3	FIB
3	06/07/2018	17,3	18,1	9,9	18,0	15,9	9,0	TV
		16,7	19,9	10,7	17,6	15,9	9,5	AE
		16,1	19,1	10,2	17,5	16,2	8,9	FIB
4	18/07/2018	12,2	32,8	13,4	12,8	27,9	16,4	TV
		11,0	52,8	16,3	12,4	27,9	17,3	AE
		10,3	44,4	14,9	12,0	28,0	16,2	FIB
5	19/07/2018	3,0	47,5	17,0	14,6	40,7	21,0	TV
		11,6	60,1	20,5	14,7	40,6	22,4	AE
		10,4	56,1	19,6	14,4	40,9	20,7	FIB
6	20/07/2018	17,9	27,5	8,7	19,3	24,3	5,6	TV
		14,4	37,5	9,8	19,5	24,8	5,8	AE
		13,4	36,0	8,2	20,3	25,2	5,4	FIB
7	01/08/2018	11,1	41,0	10,8	10,0	26,5	11,7	TV
		8,9	56,2	11,9	9,2	27,8	12,9	AE
		8,6	45,9	11,0	8,3	27,8	11,7	FIB

Tabela 12 – Dados da temperatura superficial externa (°C) e inferior (°C) das diferentes coberturas no período do inverno (continuação).

Coleta	Data da coleta (dd/mm/aaa)	Experimento						Tipos *
		Temp. Sup. Externa (°C)			Temp. Sup. Inferior (°C)			
		7h	12h	18h	7h	12h	18h	
8	02/08/2018	13,7	35,3	13,4	13,3	23,8	12,0	TV
		13,2	51,0	15,4	12,9	23,4	12,8	AE
		12,7	41,2	14,1	12,5	23,5	12,1	FIB
9	06/08/2018	5,0	35,5	8,2	7,0	23,8	11,5	TV
		0,8	52,8	8,4	6,0	28,4	13,1	AE
		0,5	47,7	7,9	6,2	29,1	11,4	FIB
10	29/08/2018	13,5	53,8	12,7	14,7	40,8	14,4	TV
		12,3	71,4	16,9	14,5	41,3	16,0	AE
		11,6	65,0	14,8	14,3	41,5	14,3	FIB
11	30/08/2018	16,5	52,5	20,8	17,6	45,3	24,3	TV
		14,7	70,1	25,6	17,2	46,3	26,1	AE
		14,2	63,9	22,4	16,8	46,6	22,5	FIB
12	31/08/2018	19,1	47,3	16,7	19,8	39,4	19,3	TV
		18,5	30,7	21,2	19,6	42,5	21,1	AE
		17,1	53,8	18,6	19,2	40,5	18,4	FIB
13	12/09/2018	18,0	41,7	12,1	17,0	27,9	15,6	TV
		20,8	61,1	16,9	17,1	28,8	17,2	AE
		15,1	53,8	15,2	16,4	27,2	14,9	FIB
14	13/09/2018	20,7	16,6	12,2	19,6	15,8	12,6	TV
		21,9	17,0	14,9	19,1	15,7	13,7	AE
		19,3	16,2	13,7	18,8	15,5	12,6	FIB
15	14/09/2018	17,2	46,3	12,4	17,8	32,9	9,8	TV
		17,1	58,5	13,1	17,6	33,1	10,2	AE
		17,4	53,9	12,3	17,7	31,5	10,4	FIB

*Os tipos de tratamentos analisados na tabela acima referem-se a telhado verde (TV), argila expandida (AE) e fibrocimento (FIB).

Na tabela 13 são apresentados os dados de temperaturas superficial externa e inferior nos dias e horários estipulados para a coleta durante a estação da primavera (21 de setembro à 20 de dezembro). A intenção é obter uma base para comparativo da temperatura superficial externa e interna coletadas das coberturas.

Tabela 13 – Dados da superficial externa (°C) e inferior (°C) das diferentes coberturas no período da primavera.

Coleta	Data da coleta (dd/mm/aaaa)	Experimento						Tipos *
		Temp. Sup. Externa (°C)			Temp. Sup. Inferior (°C)			
		7h	12h	18h	7h	12h	18h	
1	26/09/2018	33,3	23,9	16,9	28,4	19,2	14,3	TV
		34,5	30,1	17,3	29,7	20,1	14,0	AE
		30,6	28,2	16,0	30,2	20,2	13,5	FIB
2	27/09/2018	18,1	30,6	17,9	17,5	24,4	17,0	TV
		17,5	36,2	21,0	16,9	24,2	17,4	AE
		17,1	34,6	19,6	16,6	24,2	17,2	FIB
3	28/09/2018	20,1	48,6	23,4	19,9	27,3	26,0	TV
		19,3	69,1	27,4	19,5	27,8	27,6	AE
		19,3	62,8	26,2	19,4	30,5	25,5	FIB
4	10/10/2018	23,0	28,6	19,2	22,1	24,0	17,7	TV
		22,8	32,7	21,5	21,8	24,3	18,3	AE
		22,7	30,9	20,9	21,7	24,3	18,0	FIB
5	11/10/2018	23,7	25,4	16,4	23,5	19,0	15,0	TV
		25,1	31,9	18,2	22,8	19,6	14,8	AE
		23,7	31,2	17,4	22,9	20,0	14,3	FIB
6	12/10/2018	22,8	47,6	27,3	21,1	36,7	27,3	TV
		24,2	57,5	29,7	20,6	38,5	28,3	AE
		22,6	57,4	29,5	20,4	37,8	27,8	FIB
7	29/10/2018	19,3	48,7	28,0	17,5	29,0	34,2	TV
		20,8	73,2	31,7	18,2	31,4	34,5	AE
		18,2	64,5	32,2	19,4	34,4	36,3	FIB
8	30/10/2018	30,0	45,9	30,8	29,3	29,3	31,5	TV
		36,8	69,9	35,2	30,1	32,1	33,0	AE
		29,2	62,1	34,7	33,5	32,8	31,2	FIB
9	02/11/2018	24,6	47,3	29,4	23,4	29,1	32,8	TV
		28,8	71,5	33,4	24,1	31,7	33,7	AE
		23,7	63,6	33,4	26,4	33,6	33,7	FIB
10	12/11/2018	26,8	46,7	31,4	25,4	33,3	30,2	TV
		28,4	68,2	43,8	25,6	35,2	33,0	AE
		24,1	64,3	39,6	25,7	36,2	31,2	FIB
11	13/11/2018	25,7	37,5	29,2	24,1	32,1	29,9	TV
		28,8	55,8	41,5	24,3	34,4	31,5	AE
		22,7	52,2	38,7	24,7	36,0	29,8	FIB
12	15/11/2018	24,7	51,7	15,8	22,8	34,7	15,6	TV
		29,2	74,1	26,1	23,1	38,0	17,9	AE
		21,3	67,8	23,1	23,7	39,3	18,2	FIB
13	29/11/2018	21,0	38,8	20,9	20,8	32,0	18,7	TV
		20,8	55,8	20,8	19,6	33,0	19,6	AE
		19,2	56,3	21,1	20,2	35,3	19,6	FIB
14	30/11/2018	22,0	38,0	22,6	21,3	28,7	19,6	TV
		21,5	51,6	26,7	20,6	29,9	22,6	AE
		20,9	50,6	26,2	20,4	30,8	21,1	FIB
15	03/12/2018	20,0	48,9	24,4	20,4	33,3	20,5	TV
		20,1	73,7	32,6	18,8	36,3	24,6	AE
		17,5	66,6	31,2	20,1	37,3	23,0	FIB

*Os tipos de tratamentos analisados na tabela acima referem-se a telhado verde (TV), argila expandida (AE) e fibrocimento (FIB).

5.5 Comparações do desempenho térmico entre os diferentes tipos de cobertura

A figura 37 mostra as temperaturas medidas nos módulos de telhado verde em todo período de medição. Na representação abaixo foi considerado a ordem de cada evento nos horários das 7h, 12h e 18h.

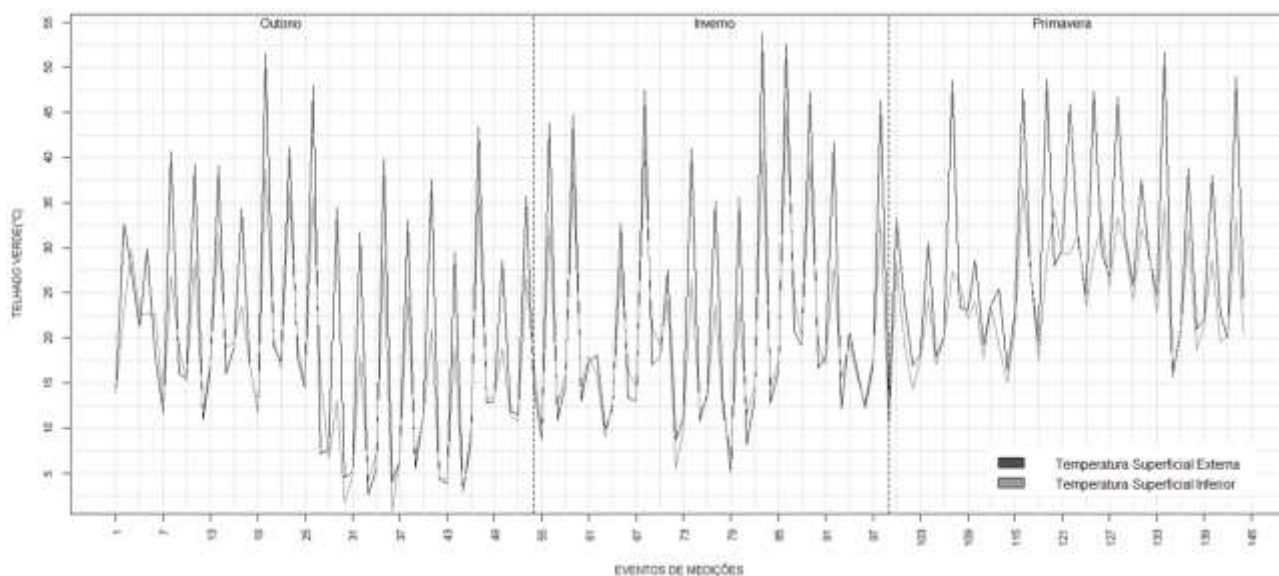


Figura 37 – Temperatura superficial externa e inferior da cobertura com telhado verde.

O desempenho térmico dos telhados verdes (figura 37) mostra que em 61% das coletas realizadas às 7h da manhã durante o outono, a temperatura superficial inferior foi maior do que a temperatura superficial externa. Isso se explica pela capacidade de isolamento térmico dos telhados verdes, onde a temperatura baixa da madrugada não interferiu na temperatura abaixo do módulo. Pode-se dizer que a evapotranspiração da grama com a formação de orvalho foi responsável por essa inércia térmica.

No dia 21/05, na medição realizada às 12h, a temperatura superficial inferior marcou 13,1°C e a externa marcou 34,4°C, os telhados verdes mostraram eficiência em até 21,3°C de amortecimento térmico. Este processo pode ser explicado devido ao aumento da temperatura e evaporação do orvalho. No final do dia às 18h, os telhados verdes apresentaram a temperatura superficial inferior mais alta em relação a temperatura superficial externa.

Na estação do inverno os telhados verdes também apresentaram a temperatura superficial inferior maior do que a externa. Assim, no dia mais frio do monitoramento dos

módulos experimentais às 7h, a temperatura superficial inferior dos telhados verdes estava 2,0°C mais quente do que a temperatura da cobertura.

Ao meio dia, foi observado que nas medições realizadas no telhado verde cuja temperatura superficial externa estava abaixo de 18,0°C, apresentaram pouca diferença entre as temperaturas da cobertura e abaixo do módulo (até 2,2°C). Entretanto, quando a temperatura superficial externa estava acima dos 18,0°C, observou-se maiores diferenças de temperatura (até 14,5°C). Referente às 18h os telhados verdes demonstraram eficiência térmica com a temperatura inferior a até 4,0°C acima da temperatura externa.

Na primavera foi observado que os telhados verdes apresentaram a temperatura superficial inferior mais baixa quando comparada a exterior às 7h. Houve um retardo na passagem do fluxo de calor, ou seja, as camadas do telhado verde impediram que este calor fosse transferido para baixo do módulo. As medições mostraram 1,9°C mais baixa da temperatura inferior em relação à exterior.

Às 12h os telhados verdes demonstraram redução de 21,3°C da temperatura da cobertura para a temperatura inferior. Nas medições às 18h foi observado que, uma parte das coletas mostravam a temperatura superficial inferior menor do que a temperatura externa quando ultrapassavam os 23,0°C da temperatura da cobertura. Em outra parte das coletas, quando apresentaram temperaturas da cobertura abaixo de 20,0°C, a temperatura superficial inferior foi mais alta. Diante destes dados foi percebido que os telhados verdes foram eficientes quanto a variação de temperatura na estação, sendo um fator positivo quanto às mudanças bruscas de temperatura.

Os dados com a cobertura com argila expandida podem ser analisados na figura 38.

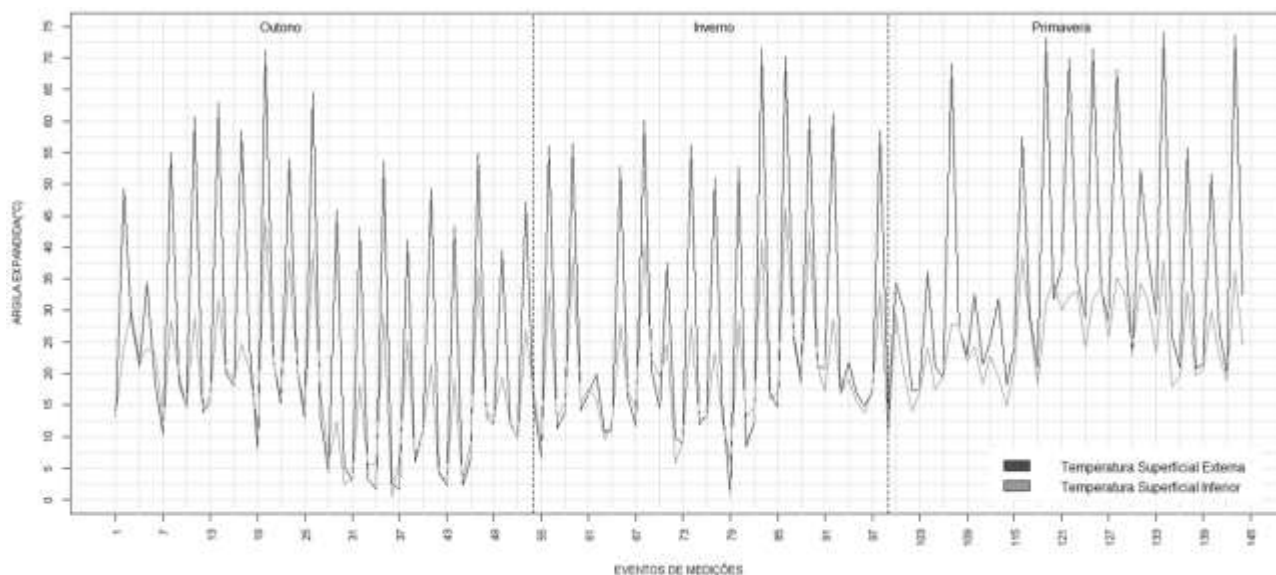


Figura 38 – Temperatura superficial externa e inferior da cobertura com argila expandida.

No outono, os módulos com argila expandida também demonstraram um bom desempenho térmico às 7h, com a temperatura superficial inferior maior do que a temperatura externa. Entretanto, a variação entre as temperaturas foi de 4,4°C.

Nas coletas às 12h, a argila expandida apresentou temperatura superficial externa máxima de 71,2°C, mesmo com a alta temperatura da cobertura o calor não foi transferido para baixo do módulo. Foi observado grande variação térmica entre as temperaturas externa e inferior chegando a 33,8°C.

Apesar deste material absorver facilmente o calor é um bom isolante térmico, atuou sombreando a cobertura diminuindo a transferência de temperatura. No meio urbano as coberturas que superaquecem e possuem baixa refletância são materiais que precisam ser evitados, pois influenciam no microclima. Igualmente foi constatado na medição às 18h quanto a eficiência do material na redução da temperatura inferior, onde a variação entre as temperaturas foi de 4,6°C.

Ao analisar a estação do inverno às 7h foi observado a temperatura inferior mais alta do que a exterior. No dia de coleta mais frio a temperatura exterior foi 0,8°C enquanto a inferior 6,0°C. Considerando os dados observados às 12h foi possível constatar que, a variação entre as temperaturas externas e inferiores nesta estação foi de 32,3°C. Apesar da argila ter absorvido a baixa temperatura externa não influenciou na temperatura inferior do módulo.

Às 18h os dados que mostraram a temperatura superficial inferior maior do que a temperatura externa (esperado para a estação) representaram 53,3% das coletas. Os outros 46,6% das coletas apresentaram a temperatura superficial inferior mais baixa.

Para esta cobertura na primavera, tanto às 7h, às 12h e às 18h apresentaram comportamentos eficientes para uma estação com altas temperaturas, ou seja, temperaturas inferiores mais amenas comparadas às temperaturas externas. Às 7h a variação térmica foi de 6,1°C. Às 12h a coleta de maior temperatura mediou 74,1°C, obteve variação entre as temperaturas externa e inferior 41,8°C. Às 18h a diferença entre as temperaturas variou até 10,8°C.

A partir da figura 39 serão discutidos os dados coletados na cobertura de fibrocimento.

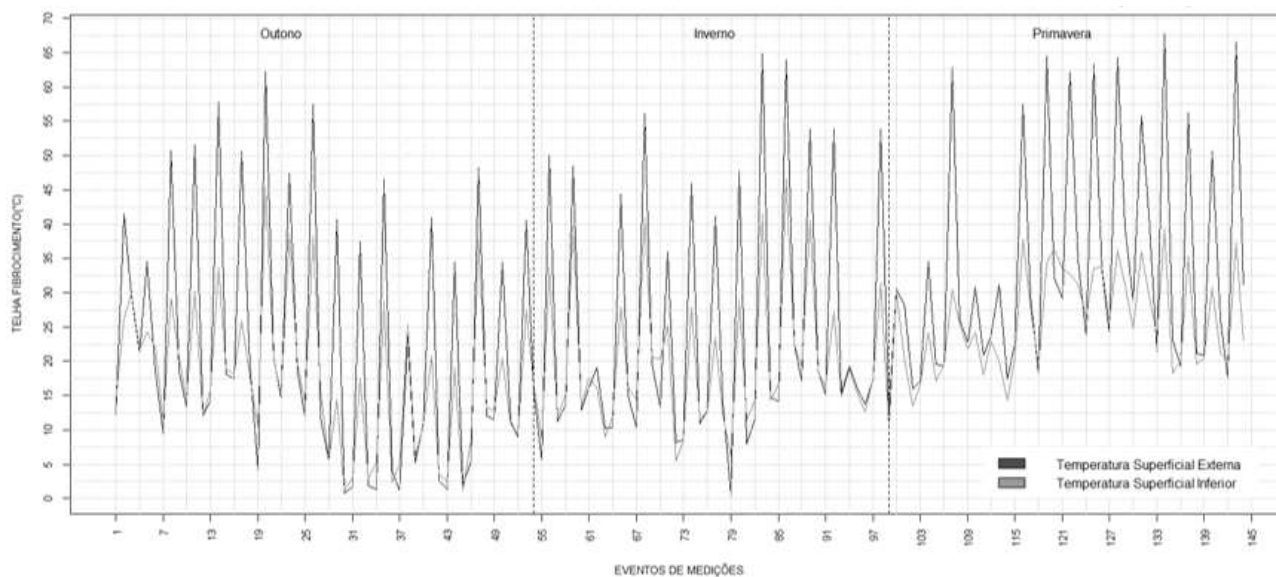


Figura 39 – Temperatura superficial externa e inferior da cobertura com fibrocimento.

No outono às 7h a cobertura com telha de fibrocimento apresentou a temperatura inferior mais alta comparada com a temperatura externa, com variação de 6,6°C. Às 12h com a temperatura superficial inferior mais baixa e a temperatura externa medindo 62,3°C, a variação foi de 26,3°C. Às 18h a temperatura inferior superou a temperatura externa, ou seja, neste horário a cobertura com fibrocimento não teve um bom desempenho térmico, a cobertura aqueceu durante o dia e transferiu o calor para baixo do módulo.

Mesmo em dias frios de inverno, às 7h a temperatura inferior sobressaiu a temperatura da cobertura, com variação de 6,9°C. Contudo às 12hs, a temperatura baixa da cobertura influenciou a temperatura inferior, onde pôde ser observado a ineficiência da telha de fibrocimento. Neste horário de coleta a cobertura apresentou variação de 26,6°C.

Nas coletas das 18h os dados mostraram que 53,3% a temperatura superficial inferior foi menor do que a temperatura externa, sendo possível notar a ineficiência por parte da cobertura. Outra menor parte das coletas, cerca de 46,7%, apresentaram a temperatura superficial inferior foi mais alta (esperado para a estação). Na variação da mais baixa temperatura 2,8°C, na mais alta 3,5°C.

Referente as coletas da primavera as telhas de fibrocimento apresentaram, às 7h, temperaturas superficiais inferiores mais altas que a temperatura da cobertura, variação de 4,3°C para mais quente. Este fato pode ser explicado pela caracterização de baixa eficiência do telhado de fibrocimento, que por sua vez, absorveu o calor e o transferiu para baixo do módulo. No entanto às 12h e às 18h, as coberturas mostraram temperaturas inferiores mais baixas. A maior temperatura externa mediu 67,8°C, apresentando variações de 32,3°C e 8,9°C, respectivamente.

Após a análise individual dos tratamentos, foi realizado uma análise comparativa nas estações e horários previstos, a fim de constatar o tipo de cobertura que apresentou melhor eficiência quanto ao desempenho térmico.

O desempenho térmico das coberturas analisados mostraram que o período da coleta de outono, às 7h da manhã em 94,4% dos dias os telhados verdes demonstraram eficiência. A temperatura superficial externa mais alta comparada a cobertura com argila e fibrocimento, chegou a medir 5,2°C a mais que os demais tratamentos. A cobertura com fibrocimento em 83,3% dos dias apresentou a temperatura mais baixa.

Em relação a temperatura superficial inferior às 7h os telhados verdes apresentaram a maior temperatura em 94,4% das coletas. O fibrocimento em 83,3% dos dias sofreu maior influência da temperatura fria da madrugada e apresentou a temperatura mais baixa com diferença de 2,1°C a menos do telhado verde.

Quanto a temperatura superficial externa às 12h em 94,4% das coletas o telhado verde apresentou menor temperatura em relação as outras coberturas. Especificamente no dia 30/04/2018 as temperaturas externas coletadas foram as mais altas de toda a estação. Neste dia o telhado verde mediu 51,5°C, o fibrocimento 62,3°C e a argila expandida chegou a 71,2°C. A argila expandida no período do outono chegou a obter 24,2°C a mais que as demais coberturas.

As coletas de temperatura superficial inferior às 12h mostraram os telhados verdes com a menor temperatura. No dia 30/04/2018 o telhado verde apresentou 6,7°C menos que as demais coberturas. Essa redução do calor dos telhados verdes se deve pela elevada inércia térmica proporcionada pelas camadas dos telhados verdes. Em 72,2% das coletas

o fibrocimento apresentou a temperatura mais alta. Esta cobertura exposta à forte radiação solar, absorve o calor e por não ter propriedades térmicas, o calor é transferido para baixo do módulo.

Às 18h a argila expandida apresentou a temperatura superficial externa mais alta em 77,7% dos dias. Com a grande variação de temperatura desta estação, foi observado que em dias que a temperatura do ar estava acima de 20,0°C os telhados verdes apresentaram a temperatura menor. Quando a temperatura do ar ficou entre 20,0°C e 3,4°C, os telhados verdes apresentaram uma temperatura intermediária aos outros tratamentos. Tratando da temperatura superficial inferior nos dias mais quentes o telhado verde apresentou temperatura mais baixa, já nos dias mais frios a argila apresentou maior temperatura.

Ao analisar os dados coletados da estação do inverno quanto a temperatura superficial externa, observou-se que os telhados verdes apresentaram maior temperatura em 80% dos dias. Em 93,3% dos dias a cobertura de fibrocimento apresentou a temperatura mais baixa, mediu até 4,5°C a menos. A temperatura superficial inferior de maior eficiência foram os telhados verdes, que em 80% das coletas apresentaram a maior temperatura. Enquanto as coberturas de fibrocimento em toda a estação demonstraram a ineficiência térmica com temperaturas baixas, os telhados verdes isolaram o frio externo e mantiveram alta a temperatura inferior.

Às 12h do inverno em 93,3% das coletas a argila expandida apresentou maior temperatura superficial externa. A temperatura mais alta da estação foi obtida no dia 29/08/2018 marcando 71,4°C. Os módulos com telhado verde apresentaram menor temperatura com até 20,0°C.

Ao comparar as temperaturas abaixo dos módulos as coberturas com fibrocimento, em 60% das coletas, apresentaram a temperatura mais alta aos demais. Os telhados verdes não demonstraram eficiência neste horário, em 53,3% das coletas apresentaram menor temperatura, foi constatado até 3,1°C mais baixo. Apesar desta conclusão, não houve grandes diferenças entre os tratamentos, as temperaturas inferiores foram muito próximas.

Quanto ao desempenho térmico das 18h, em 93,3% a argila apresentou temperatura externa mais alta com até 4,8°C a mais. Os telhados verdes mostraram em 73,3% dos dias a menor temperatura. O tratamento mais eficiente mostrado na temperatura superficial inferior foi a argila expandida. O tratamento menos eficiente foi o fibrocimento com até 3,6°C mais baixo que os demais. Os telhados verdes em 66,6%

das coletas apresentaram uma temperatura intermediária, porém mais próxima do fibrocimento.

Sobre as coletas da primavera, às 7h foi constatado que a temperatura superficial externa mais alta foi apresentada pela argila. O fibrocimento demonstrou ter a cobertura mais fria em 86,6% das coletas. Ao verificar a temperatura superficial inferior dos módulos foi constatado que em 46,6% dos dias os telhados verdes apresentaram menor temperatura, seguido dos telhados de fibrocimento com 33,3%. Na condição de maior temperatura 53,3% dos dias os telhados verdes apresentaram maior incidência. As coberturas com argila apresentaram temperaturas intermediárias.

Às 12h os telhados verdes apresentaram menor temperatura superficial externa em 93,3% das coletas, a temperatura mais baixa foi no dia 29/10/2018 medindo 24,6°C a menos que as demais. Em 93,3% dos dias, a cobertura com argila expandida apresentou temperaturas mais elevadas. Quanto a eficiência térmica neste horário, os telhados verdes em 93,3% dos eventos apresentaram menor temperatura, com 5,4°C mais baixo. Os módulos que apresentaram maior temperatura foram os com fibrocimento representando 80% das coletas.

Quanto a coleta realizada às 18h, a cobertura que apresentou menor temperatura superficial externa foi o telhado verde, com 86,6%. A argila expandida apresentou temperaturas mais elevadas em 80% das coletas. Em relação a passagem de calor para baixo do módulo foi verificado que os telhados verdes apresentaram maior eficiência, apresentando menor temperatura. A argila expandida em 60% das coletas apresentou a maior temperatura perdendo para o fibrocimento.

Para uma melhor análise foi realizada uma média de variações entre temperaturas superficiais externas e inferiores entre as coberturas segundo as estações pesquisadas. Na análise foi obtida uma variação total (outono, inverno e primavera). Para as coberturas com telhado verde foi constatado uma variação de 27,2°C, as coberturas com telha de fibrocimento totalizaram uma variação de 39,8°C e as coberturas com argila expandida obtiveram uma variação de 47,9°C.

A ANOVA não detectou diferenças significativas entre as médias dos tratamentos para as temperaturas externas medidas às 7h e às 18h em todas as estações monitoradas. Não obstante, a ANOVA também não detectou diferenças significativas entre as médias dos tratamentos para as temperaturas inferiores qualquer que fosse o horário de medição.

Por outro lado, para a temperatura superficial externa às 12h do outono, o teste ANOVA detectou diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos

tratamentos, $F(2,51) = 12,02$, $p = 5,268 \cdot 10^{-5}$. As comparações *post-hoc* utilizando o teste de Tukey-HSD indicaram que a média de temperatura superficial nos telhados verdes foi significativamente diferente das telhas de fibrocimento ($p = 4,259 \cdot 10^{-2}$) e da cobertura com argila expandida ($p = 2,94 \cdot 10^{-5}$). Do mesmo modo, o teste de Tukey-HSD indicou diferença significativa entre as telhas de fibrocimento e a argila expandida ($p = 4,913 \cdot 10^{-2}$).

Nos dados de temperatura superficial externa às 12h do inverno, o teste Wilcoxon detectou diferenças significativas entre os telhados verdes e as telhas de fibrocimento ($W = 63$, $p = 4,202 \cdot 10^{-2}$) e argila expandida ($W = 40$, $p = 2,82 \cdot 10^{-3}$). Porém, o teste de Wilcoxon não indicou diferença significativa entre as coberturas com argila expandida e fibrocimento ($W = 153$, $p = 9,702 \cdot 10^{-2}$). O mesmo pôde ser observado nos dados de temperatura às 12h na primavera, onde foi detectado diferenças significativas entre os telhados verdes e as telhas de fibrocimento ($W = 47$, $p = 5,704 \cdot 10^{-3}$) e argila expandida ($W = 46$, $p = 6,184 \cdot 10^{-3}$). Entre as coberturas com argila expandida e fibrocimento não se detectou diferença significativa.

Nos dados de temperatura inferior às 12h na primavera, o teste não-paramétrico de Wilcoxon não detectou diferenças significativas entre os telhados verdes e as telhas de fibrocimento ($W = 73$, $p = 1,057 \cdot 10^{-1}$) e argila expandida ($W = 90,5$, $p = 3,724 \cdot 10^{-1}$), do mesmo modo, entre argila expandida e fibrocimento ($W = 97,5$, $p = 5,474 \cdot 10^{-1}$).

6 CONCLUSÕES

A análise comparativa no experimento demonstrou uma significativa diferença na capacidade de retenção de água de chuva e nas temperaturas superficiais externas do telhado verde em relação aos telhados com argila expandida e telhado de fibrocimento. Quanto as temperaturas superficiais inferiores, não houve diferença significativa entre as coberturas analisadas.

Para chuvas de até 19,4mm os telhados verdes demonstraram eficiência na retenção do escoamento superficial. Comparados com os telhados verdes, as coberturas com argila expandida apresentaram menor capacidade de retenção. Nas coberturas com fibrocimento praticamente todo o volume da água foi escoado.

Em situações de eventos de chuva acima de 30mm e com chuva antecedente recente a eficiência de retenção dos telhados verdes testados pode não ser suficiente para controlar o escoamento superficial.

Foi possível constatar que os telhados verdes apresentaram menor variação nos valores de temperatura, isso remete a uma melhor estabilidade térmica. Dessa forma, foi observado que os telhados verdes foram eficientes e podem ser utilizados como isolante térmico na cobertura.

As coberturas com argila expandida em alguns horários e estações, demonstraram uma melhor eficiência que os telhados verdes, ou uma melhor condição em relação às coberturas com fibrocimento. Deste modo, pode ser utilizada em edificações como alternativa na redução térmica, pois é um material com propriedades isolantes que minimizam a transferência de temperaturas extremas para as camadas inferiores. Porém o uso da argila em coberturas em grande escala pode proporcionar a formação de ilhas de calor. Devido ao superaquecimento do material e este reirradiar o calor para superfícies vizinhas alterando o microclima.

Apesar desta pesquisa estar voltada às questões de redução de alagamentos e questões de ilhas de calor urbano/desconforto térmico, é necessário reforçar os outros benefícios, e não menos importantes, relacionados aos telhados verdes. Benefícios estes que tem a intenção de devolver o meio natural onde deu lugar a edificação, promover a biodiversidade, melhoria da qualidade do ar, contribuir para a resiliência do meio urbano.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

As sugestões aqui apresentadas são no sentido de aprofundar os estudos no experimento executado:

- Investigar o comportamento térmico das coberturas pesquisadas no verão;
- Comparar diferentes espécies vegetais para avaliar a capacidade de retenção de água, bem como, o comportamento térmico das mesmas;
- Comparar diferentes sistemas de coberturas para avaliar o comportamento térmico das mesmas;
- Utilizar equipamentos para monitoramento das temperaturas em tempo real;
- Fazer fechamentos e divisões abaixo dos módulos experimentais a fim de reduzir a influência entre as unidades e quantificar a temperatura interna de cada cobertura;
- Estimar a evapotranspiração dos módulos com telhados verdes;
- Utilizar reservatórios de maior capacidade para coletas de chuvas de maior intensidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 15220-2: Desempenho Térmico de edificações - parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. In: **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Rio de Janeiro: [s.n.]. p. 21.

ABNT. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações - parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. In: **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Rio de Janeiro: [s.n.]. p. 23.

ABREU, P. G. DE et al. Análise termográfica da temperatura superficial de telhas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 11, p. 1193–1198, 2011.

ADLER, F. R.; TANNER, C. J. **Ecosistemas urbanos: princípios ecológicos para o ambiente contruído**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2015.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BACH, P. M. et al. A critical review of integrated urban water modelling - Urban drainage and beyond. **Environmental Modelling and Software**, v. 54, p. 88–107, 2014.

BALLARD, B. W. et al. **The SuDS Manual**. CIRIA ed. London: [s.n.].

BARBOSA, A. E.; FERNANDES, J. N.; DAVID, L. M. Key issues for sustainable urban stormwater management. **Water Research**, v. 46, n. 20, p. 6787–6798, 2012.

BARRA, E. **O homem e a paisagem construída**. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitetismo/01.006/1349>>. Acesso em: 11 jun. 2018.

BIANCHINI, F.; HEWAGE, K. How “ green ” are the green roofs ? Lifecycle analysis of green roof materials. **Building and Environment**, v. 48, p. 57–65, 2012.

BRENNEISEN, S. Space for Urban Wildlife : Designing Green Roofs as Habitats in Switzerland. **Urban Habitats**, v. 4, n. 1, p. 27–36, 2006.

BREUNING, J. **Fire & wind on extensive green roofs**. Baltimore, MD: Proceedings of the Sixth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities, 2008Disponível em: <http://www.greenrooftechnology.com/_literature_53264/Fire_and_Wind_on_Extensive_Green_Roofs>

BROMBACH, H.; WEISS, G.; FUCHS, S. A new database on urban runoff pollution :

- comparison of separate and combined sewer systems. **Water Science and Technology**, v. 51, p. 119–128, 2005.
- CAMPISANO, A. et al. Potential for Peak Flow Reduction by Rainwater Harvesting Tanks. **Procedia Engineering**, v. 89, p. 1507–1514, 2014.
- CARTER, J. G. et al. Climate change and the city: building capacity for urban adaptation. **Progress in Planning**, v. 95, p. 1–66, 2015.
- CARTER, T.; KEELER, A. Life-cycle cost – benefit analysis of extensive vegetated roof systems. **Environmental Management**, v. 87, p. 350–363, 2008.
- COSTA, A. F. G. M.; PASCHOALIN FILHO, J. A.; LEITE, B. C. C. **Desempenho térmico de módulos executados em light steel frame com cobertura verde e com telhas de fibrocimento**. São Paulo: VI Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade e V Encontro Luso-Brasileiro de Estratégia, 2017
- DARAIA, P. S.; REDA, A. L. DE L. **Telhados verdes : estudo quantitativo de eficácia técnica e econômica**. Vila Real, Portugal: XVII Safety, Health and Environment World Congress, 2017
- DE-VILLE, S. et al. The impact of green roof ageing on substrate characteristics and hydrological performance. **Journal of Hydrology**, v. 547, p. 332–344, 2017.
- DOHERTY, M.; KLIMA, K.; HELLMANN, J. J. Climate change in the urban environment : advancing, measuring and achieving resiliency. **Environmental Science and Policy**, v. 66, p. 310–313, 2016.
- EDWARDS, B. **O guia básico para a sustentabilidade**. Barcelona, Espanha: Gustavo Gili, 2008.
- FLETCHER, T. D. et al. SUDS , LID , BMPs , WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12(7), n. October, p. 37–41, 2014.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual do conforto térmico**. 5ª edição ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: [s.n.].
- GETTER, K. L.; ROWE, D. B. The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. **HortScience**, v. 41, n. 5, p. 1276–1285, 2006.
- GETTER, K. L.; ROWE, D. B.; ANDRESEN, J. A. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. **Ecological Engineering**, v. 31, p. 225–231, 2007.

GOLDENFUM, J. A. et al. **Challenges for the sustainable urban stormwater management in developing countries: from basic education to technical and institutional issues**. 6th Conference on Sustainable Techniques and Strategies for Urban Water Management Novatech, 2007

Green roof technology. Disponível em: <<http://www.greenrooftechnology.com/resources>>. Acesso em: 4 abr. 2018.

HEYWOOD, H. **101 regras básicas para uma arquitetura de baixo consumo energético**. São Paulo: Gustavo Gili, 2012.

INMET. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

Institute Physics in Berlin. Disponível em: <<http://www.gebaeudekuehlung.de/en/index.html>>. Acesso em: 5 jul. 2018.

JOBIM, A. L. **Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo da água pluvial**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

JOHN, V. M.; SAVASTANO JUNIOR, H. **Perspectivas do fibrocimento sem amianto no Brasil**. Disponível em: <www1.folha.uol.com.br/opinia0/2014/02/1409192-holmer-savastano-jr-e-vanderley-m-john-perspectivas-do-fibrocimento-sem-amianto-no-brasil.shtml>. Acesso em: 5 mar. 2018.

KÖHLER, M. et al. Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. **Environmental Management and Health**, n. 13 (4), p. 382–391, 2002.

KÖHLER, M. Long-Term Vegetation Research on Two Extensive Green Roofs in Berlin. v. 4, n. 1, 2005.

KOLB, W. **Telhados de Cobertura Verde e Manejo de Águas Pluviais**. Petrolina: IV Simposio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva, 2003 Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/37031188/telhado_de_cobertura_verde_manejo_de_aguas.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1517956475&Signature=OD65pY99s165GDe4G8oP29ysJ9M%3D&response-content-disposition=inline%3B filename%3DTelha>

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. PW ed. São Paulo: [s.n.].

LI, H. et al. Science of the Total Environment A new method to quantify surface urban heat island intensity. **Science of the Total Environment**, v. 624, p. 262–272, 2018.

- LIESCHEIDT, S. Green Roofs - Federal Energy Management Program. **CED Engineering**, n. 877, p. 33, 2011.
- LIN, B. et al. Impact of climatic conditions on the thermal effectiveness of an extensive green roof. **Building and Environment**, v. 67, p. 26–33, 2013.
- LIU, K. Engineering performance of rooftop gardens through field evaluation. **Interface**, n. February, p. 4–12, 2004.
- LOPES, D. A. R. **Análise do comportamento térmico de uma Cobertura Verde Leve (CVL) e diferentes sistemas de cobertura**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2007.
- MACHADO, M. V; BRITTO, C.; NEILA, J. **La conductividad térmica equivalente en la cubierta ecológica**. São Pedro, SP: VI Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construido, 2001Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/encac/files/2001/A0112.pdf>>
- MARLOW, D. R. et al. Towards sustainable urban water management: a critical reassessment. **Water Research**, v. 47, p. 7150–7161, 2013.
- MARQUES, A. S. et al. **Hidrologia urbana - Sistemas de drenagem de águas pluviais urbanas**. Universida ed. Lisboa: [s.n.].
- MASCARÓ, J. L.; MASCARÓ, L.; AGUIAR, C. M. L. S. Cidade: energia, arborização urbana e impacto ambiental. **Ciência e Ambiente**, p. 59–72, 2001.
- MASCARÓ, L.; MASCARÓ, J. **Vegetação urbana**. 2ª edição ed. Porto Alegre: Mais Quatro Editora, 2005.
- MELVILLE-SHREEVE, P.; WARD, S.; BUTLER, D. Rainwater Harvesting Typologies for UK Houses : A Multi Criteria Analysis of System Configurations. **Water**, v. 8, n. 4, 2016.
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2011.
- MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century ? **Landscape and Urban Planning**, v. 77, p. 217–226, 2006.
- MICHELS, C.; LAMBERTS, R.; GUTHS, S. **Avaliação da redução no fluxo de calor proporcionada pelo uso de barreiras radiantes em cobertura**. Florianópolis/ SC: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construido, 2006Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006_4188_4196.pdf>
- MINKE, G. **Techos verdes - Planificación, ejecución, concejos prácticos**. Uruguay: Fin del Siglo, 2005.

- MOLINA, A. M. C. et al. **Software para dimensionar sistemas drenantes de baixo impacto sob praças , parques , áreas de lazer ou vias peatonais areas or pedestrian lanes**. Vila Real, Portugal: XVII Safety, Health and Environment World Congress, 2017Disponível em: <<http://www.copec.eu/shewc2017/proc/works/10.pdf>>
- MONTERUSSO, M. A.; ROWE, D. B.; RUGH, C. L. Establishment and Persistence of Sedum spp . and Native Taxa for Green Roof Applications. **HortScience**, v. 40, n. 2, p. 391–396, 2005.
- MUSY, M.; MALYS, L.; INARD, C. Assessment of direct and indirect impacts of vegetation on building comfort : A comparative study of lawns , green walls and green roofs. **Procedia Environmental Sciences**, v. 38, p. 603–610, 2017.
- NAGASE, A.; DUNNETT, N. Landscape and Urban Planning Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs : Effects of plant species , diversity and plant structure. **Landscape and Urban Planning**, v. 104, p. 356–363, 2012.
- NIEMCZYNOWICZ, J. Urban hydrology and water management - present and future challenges. **Urban Water**, v. 1, p. 1–14, 1999.
- OBERNDORFER, E. et al. Green Roofs as Urban Ecosystems : Ecological Structures , Functions , and Services. **BioScience**, v. 57, n. 10, p. 823–833, 2007.
- OHNUMA JUNIOR, A. A. **Medidas não convencionais de reservação d ' água e controle da poluição hídrica em lotes domiciliares**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2008.
- OLIVEIRA, P. L. DE; SOARES, R. G.; SANTOS, S. X. Desempenho térmico das edificações : estudo comparativo entre o telhado verde e outros tipos de coberturas. **Revista Petra**, p. 36–55, 2016.
- ONU: mais de 70% da população mundial viverá em cidades até 2050**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/onu-mais-de-70-da-populacao-mundial-vivera-em-cidades-ate-2050/>>. Acesso em: 15 abr. 2018.
- PACHECO, P. R. DA C. et al. A view of the legislative scenario for rainwater harvesting in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 290–294, 2017.
- PALLA, A.; GNECCO, I.; LANZA, L. G. Hydrologic Restoration in the Urban Environment Using Green Roofs. **Water**, v. 2, p. 140–154, 2010.
- PECK, S. W. et al. **Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada**. Canada: Canada Mortgage and Housing Corporation, 1999.
- PINTO, L. H.; PINHEIRO, S. A. **Orientações Básicas para Drenagem Urbana**. Belo Horizonte: FEAM, 2006.

- RANKRAPE, F. et al. **Análise histórica de dados de precipitação, temperatura média e evapotranspiração potencial para o município de Dois Vizinhos - Pr.** III Congresso de Ciência e Tecnologia da UTFPR-DV. **Anais...Dois Vizinhos: 2015**
- RELF, D.; MCDANIEL, A. R.; BUTTERFIELD, B. Attitudes toward Plants and Gardening. **HortTechnology**, v. 2, n. June, p. 201–204, 1992.
- RELF, P. D.; LOHR, V. I. Human Issues in Horticulture. v. 38, n. 5, p. 984–993, 2003.
- RENTERGHEM, T. VAN; BOTTELDOOREN, D. **Sound reduction by vegetated roof tops (green roofs): a measurement campaign.** Osaka, Japan: 40th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2011Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/266051943_Sound_reduction_by_vegetated_roof_tops_green_roofs_a_measurement_campaign>
- ROLA, S. M. **A natureza como ferramenta para a sustentabilidade de cidades: estudo da capacidade do sistema de natureza em filtrar a água de chuva.** [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- ROSE, L. S.; AKBARI, H.; TAHA, H. **Characterizing the fabric of the urban environment: a case study of greater Houston , Texas,** 2003. Disponível em: <<https://escholarship.org/uc/item/3ww7p48f>>
- ROSPI, G. et al. Microclimate of territory of Matera and the heat island effect. **Energy Procedia**, v. 133, p. 2–15, 2017.
- SAADATIAN, O. et al. A review of energy aspects of green roofs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 155–168, 2013.
- SAVI, A. C. **Telhados verdes : uma análise da influência das espécies vegetais no seu desempenho na cidade de Curitiba.** [s.l.] UNiversidade Federal do Paraná, 2015.
- SCHOLZ-BARTH, K. Fonte : Environmental Design & Construção , Característica. **EDC Magazine**, 2001.
- SHARIFI, E.; LEHMANN, S. Comparative analysis of surface urban heat island effect in Central Sydney. **Journal of Sustainable Development**, v. 7, n. 3, p. 23–34, 2014.
- SILVA, J. G. C. DA. **Estatística experimental: planejamento de experimentos.** Pelotas, RS: UFPel, 2006.
- SILVA, T. F. DA; PAIVA, A. L. R. DE; SANTOS, S. M. DOS. **Capacidade de retenção de água em um telhado verde : Estudo de caso em Caruaru.** Brasília, DF: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015
- SIMMONS, M. T. et al. Green roofs are not created equal : the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs

in a sub-tropical climate. **Urban Ecosystems**, p. 339–348, 2008.

SOLTANI, A.; SHARIFI, E. Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide. **Frontiers of Architectural Research**, v. 6, p. 529–538, 2017.

SOUZA, A. M. et al. **Introdução a projetos de experimentos**. Santa Maria, RS: UFSM, 2002.

SPEAK, A. F. et al. Science of the Total Environment Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. **Science of the Total Environment**, v. 461–462, p. 28–38, 2013.

STEENEVELD, G. et al. An urban climate assessment and management tool for combined heat and air quality judgements at neighbourhood scales. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 132, p. 204–217, 2018.

STOVIN, V.; POE, S.; BERRETTA, C. A modelling study of long term green roof retention performance. **Environmental Management**, v. 131, p. 206–215, 2013.

STOVIN, V.; VESUVIANO, G.; KASMIN, H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. **Journal of Hydrology**, v. 414–415, p. 148–161, 2012.

SUSCA, T.; GAFFIN, S. R.; DELL’OSSO, G. R. Positive effects of vegetation : Urban heat island and green roofs. **Environmental Pollution**, v. 159, p. 2119–2126, 2011.

TASSI, R. et al. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 3, p. 139–154, 2014.

TAVARES, P. A.; CÂMARA, L. D. T. Estudo e avaliação das propriedades térmicas de coberturas verdes utilizando o gênero *Commelina*. **Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis**, v. 11, n. 1, p. 1–12, 2017.

TEEMUSK, A.; MANDER, Ü. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events. **Ecological Engineering**, v. 30, p. 271–277, 2007.

The hanging gardens of babylon: the mysterious wonder of the ancient. Disponível em: <<https://www.ancient.eu/article/129/the-hanging-gardens-of-babylon-the-mysterious-wond/>>. Acesso em: 12 jun. 2018.

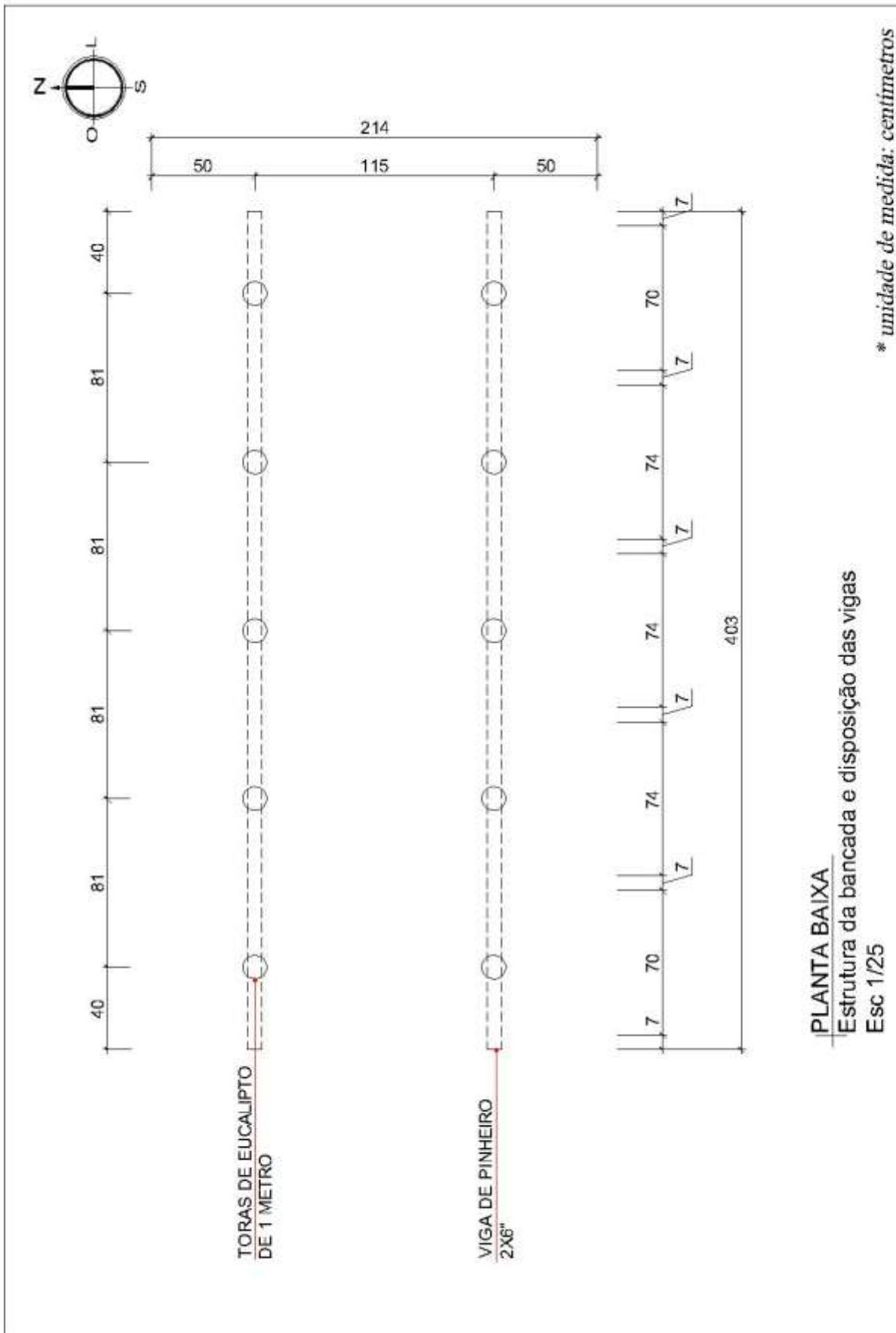
TIEPO, C. et al. **Permeabilidade urbana e infraestrutura verde : alternativas para a sustentabilidade urbana**. Passo Fundo, RS: 3º Seminário Nacional de Construções Sustentáveis, 2014

TUCCI, C. E. M. Água no meio urbano. In: **Água Doce**. [s.l: s.n.]. p. 1–40.

- VASCONCELOS, M. Avaliação de transmitância térmica de coberturas. **Vertes arquitetura bioclimática e eficiência energética**, p. 1–8, 2011.
- VIANNA, N. S.; GONÇALVES, J. C. S. **Iluminação e arquitetura**. São Paulo, SP: Virtus s/c Ltda, 2001.
- VIDMAR, J.; KELLEY, K.; BERGHAGE, R. Background educational and promotional materials for green roofs: A series of articles to promote understanding of the benefits of using green roofs. In: **Quantifying evaporation and transpirational water losses from green roofs and green roof media capacity for neutralizing acid rain**. Pennsylvania: [s.n.]. p. 94.
- VITTORINO, F.; SATO, N. M. N.; AKUTSU, M. **Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas**. Curitiba: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2003
- WEBER, F. et al. Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus. p. 52, 2017.
- WILKINSON, S. et al. Evaluating the Thermal Performance of Retrofitted Lightweight Green Roofs and Walls in Sydney and Rio de Janeiro. **Procedia Engineering**, v. 180, n. 0, p. 231–240, 2017.
- WILLES, J. A. **Tecnologias em telhados verdes extensivos: meios de cultura, caracterização hidrológica e sustentabilidade do sistema Piracicaba**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2014.
- WONG, N. H. et al. Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. **Building and Environment**, v. 38, p. 499–509, 2003a.
- WONG, N. H. et al. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. **Building and Environment**, v. 38, p. 261–270, 2003b.
- WONG, T. H. F. Water sensitive urban design – the journey thus far. **Environment Design Guide**, n. August, 2007.
- YANG, J.; YU, Q.; GONG, P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. **Atmospheric Environment**, v. 42, p. 7266–7273, 2008.
- YANG, L. et al. Research on Urban Heat-island Effect. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 11–18, 2016.
- ZELENAKOVA, M. et al. Climate change in urban versus rural areas. **Procedia Engineering**, v. 119, p. 1171–1180, 2015.

ZHANG, L. et al. Simulated study on the potential of building energy saving using the green roof. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 1469–1476, 2017.

APÊNDICE A – PROJETO ARQUITETÔNICO DO EXPERIMENTO

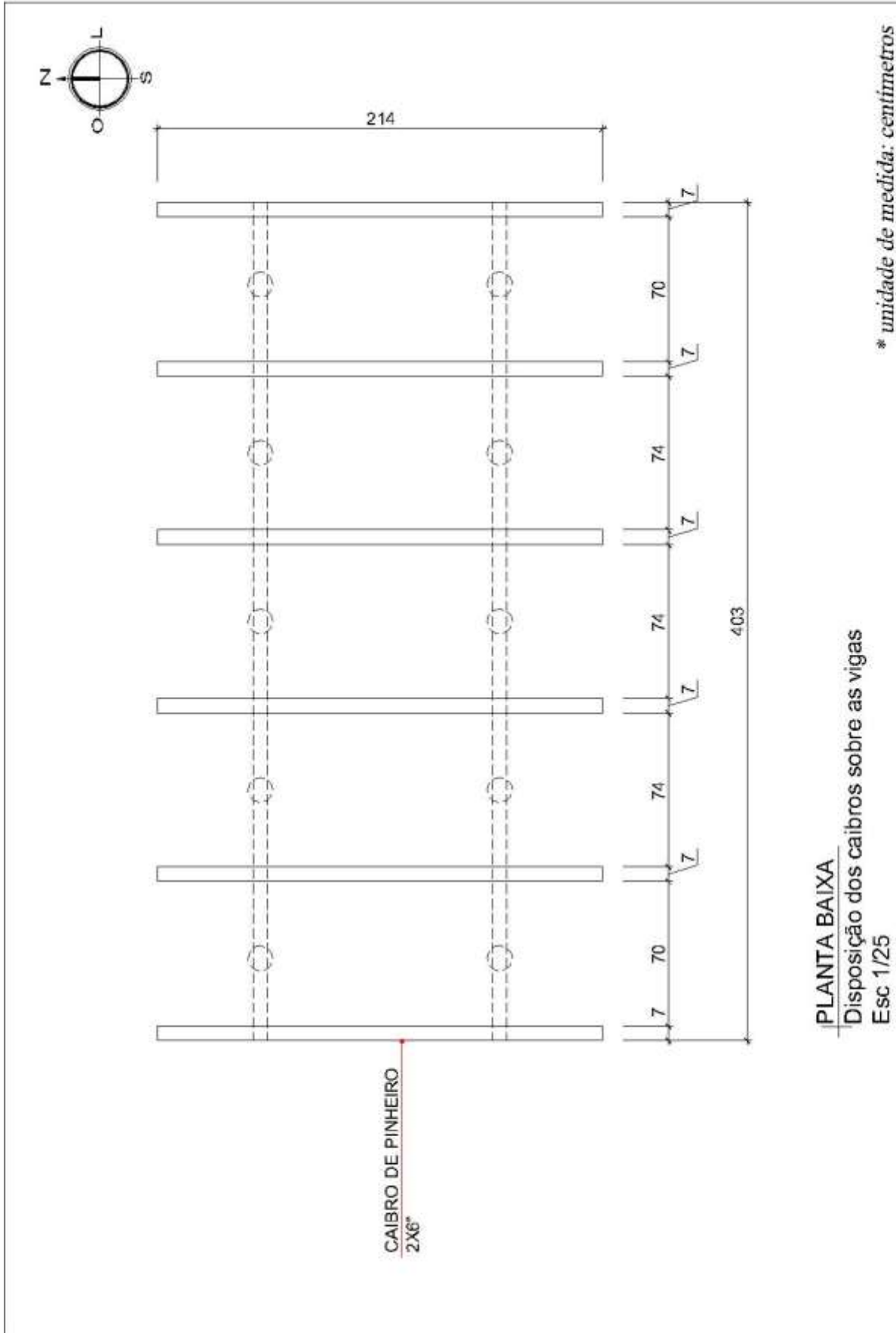


AUTORES:

Arq. Carolina Pereira dos Santos
Prof. Dr. César Augusto Medeiros Destro
Prof.^a Dr.^a Flávia Gizele König Brun

PROTÓTIPO TELHADO VERDE

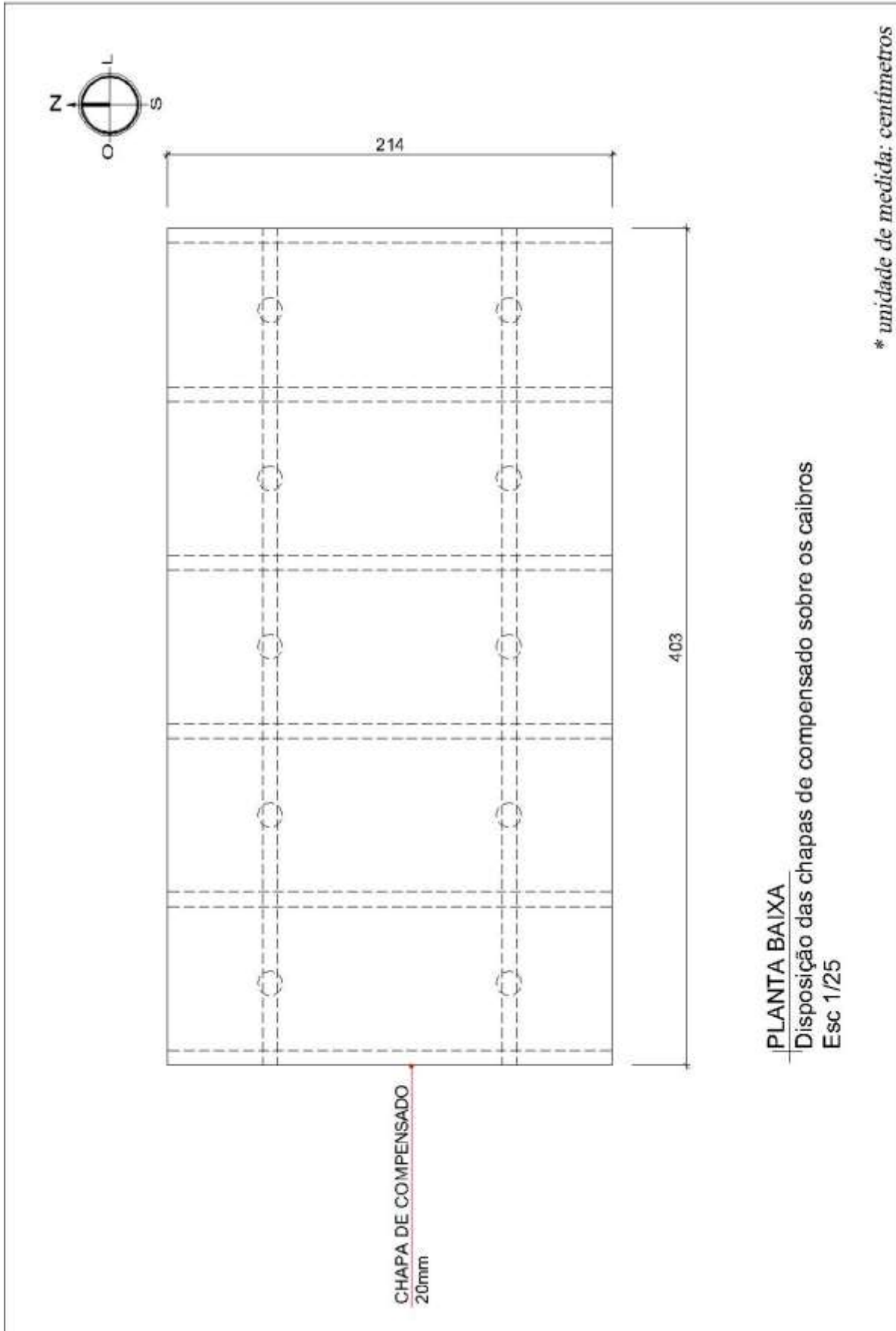
Data: Outubro/ 2018
Escala: 1/25
Prancha: 01/05

**AUTORES:**

Arq. Carolina Pereira dos Santos
Prof. Dr. César Augusto Medeiros Dcstro
Prof.ª Dr.ª Flávia Gizele König Brun

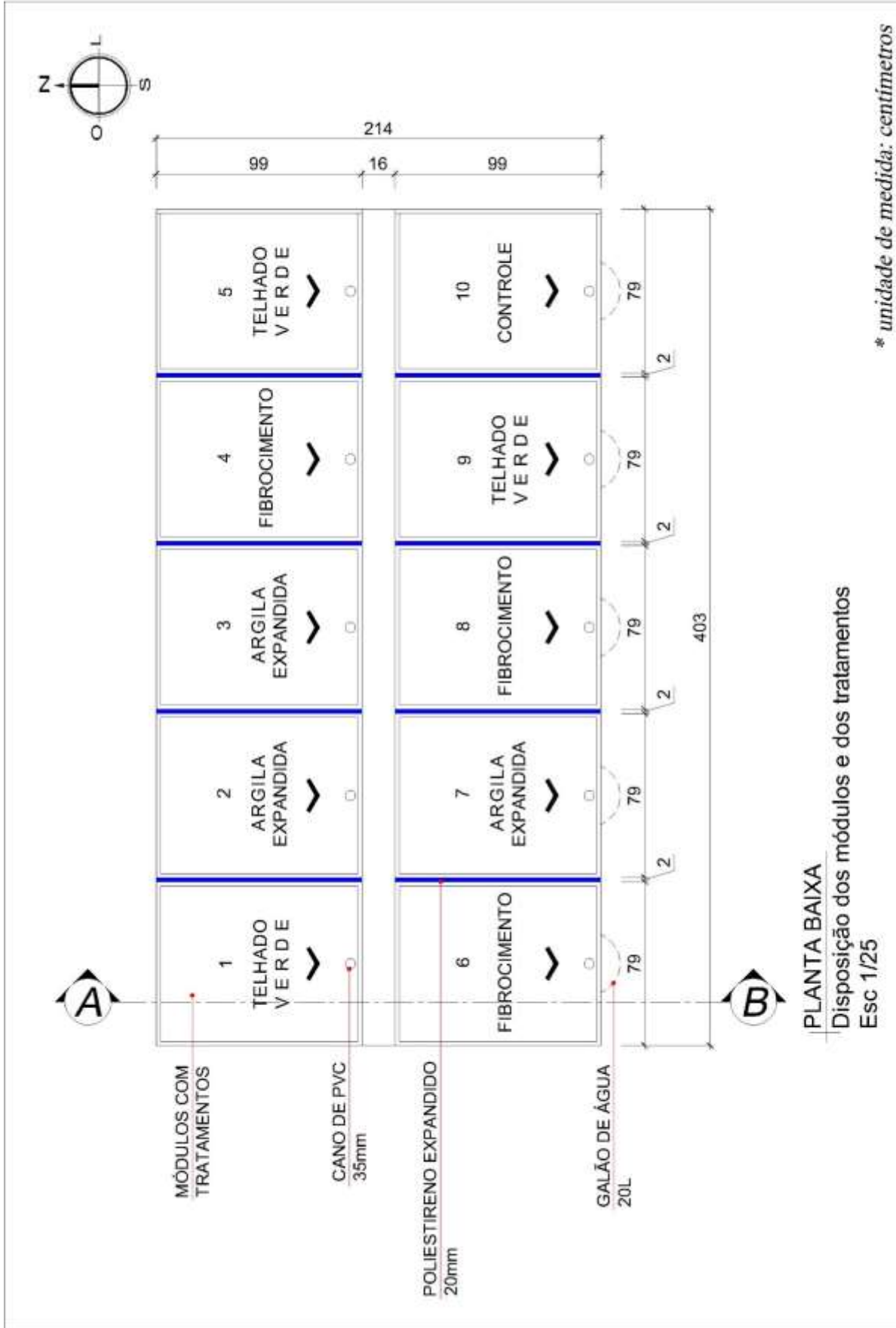
PROTÓTIPO TELHADO VERDE

Data: Outubro/ 2018
Escala: 1/25
Prancha: 02/05



AUTORES:
Arq. Carolina Pereira dos Santos
Prof. Dr César Augusto Medeiros Destro
Prof. Dr.ª Flávia Gizele König Brun

PROTÓTIPO TELHADO VERDE
Data: Outubro/ 2018
Escala: 1/25
Prancha: 03/05

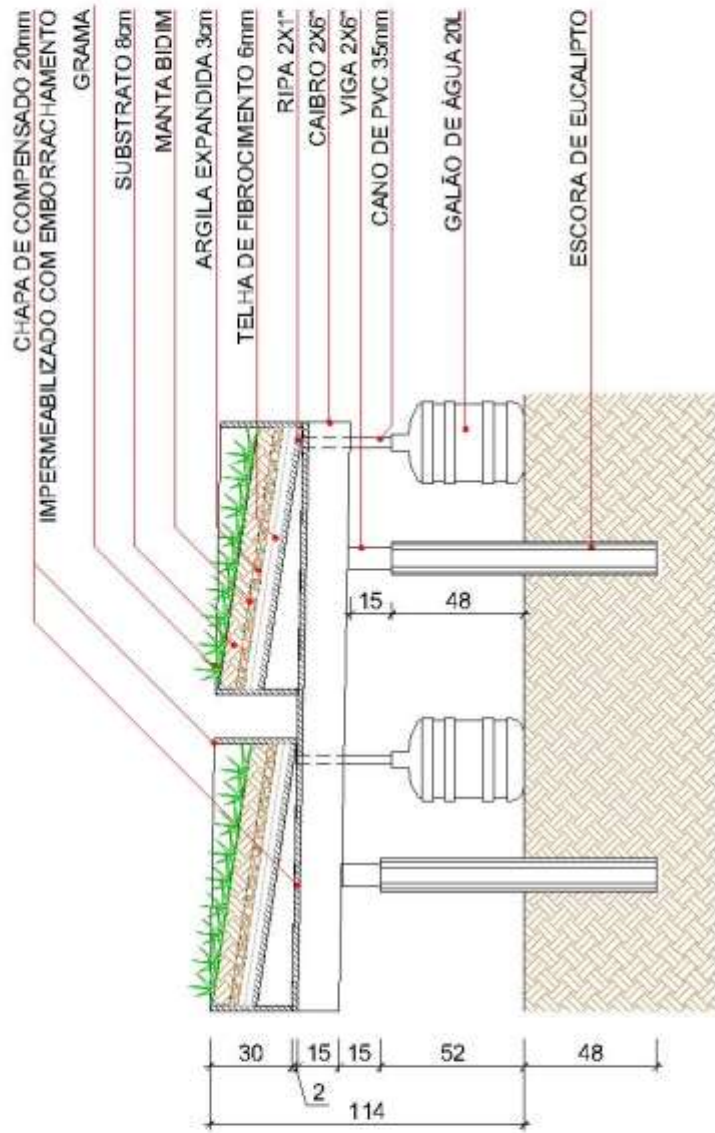


AUTORES:

Arq. Carolina Pereira dos Santos
 Prof. Dr César Augusto Medeiros Destro
 Profª Drª Flávia Gizcle König Brun

PROTÓTIPO TELHADO VERDE

Data: Outubro/ 2018
 Escala: 1/25
 Prancha: 04/05



CORTE A-B

Especificação dos materiais utilizados
 Esc 1/25

* unidade de medida: centímetros

AUTORES:

Arq. Carolina Pereira dos Santos
 Prof. Dr César Augusto Medeiros Destro
 Profª Drª Flávia Gizele König Brun

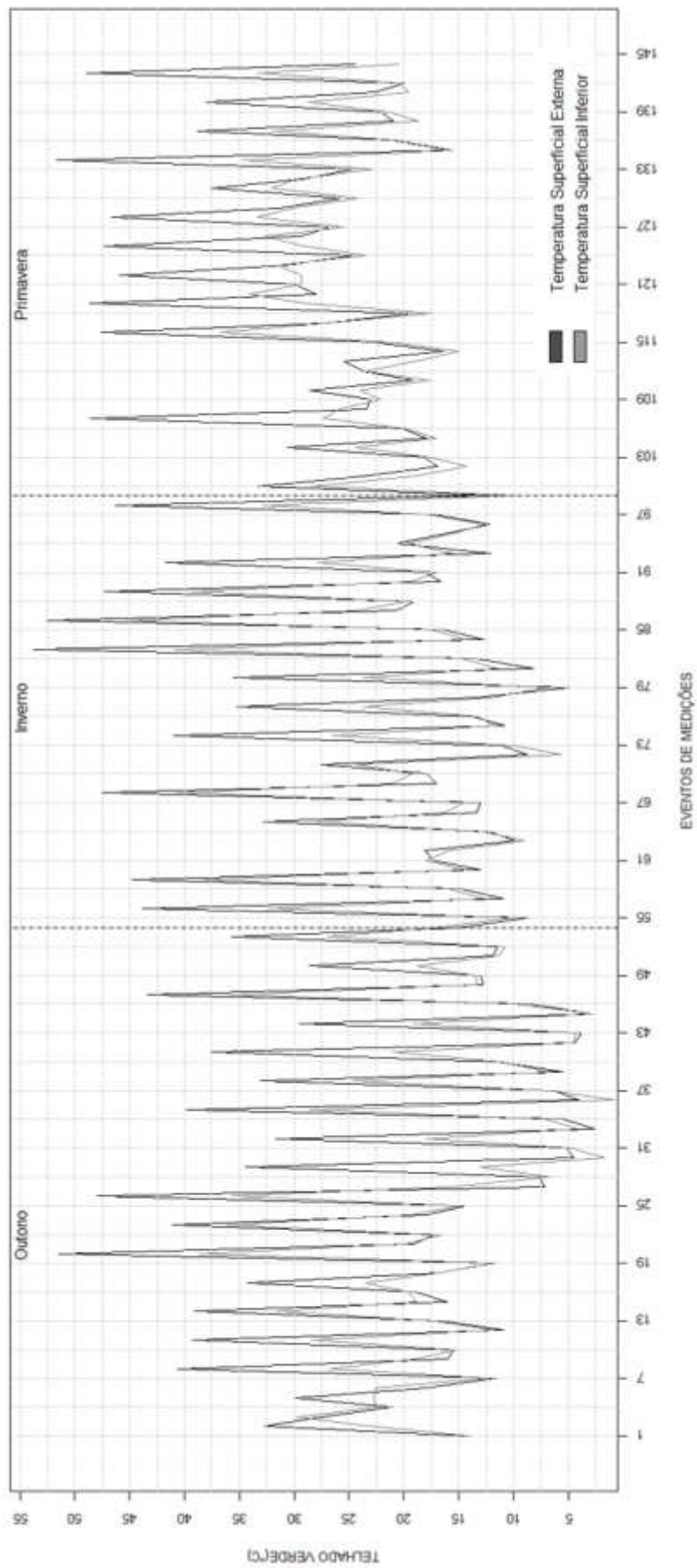
PROTÓTIPO TELhado VERDE

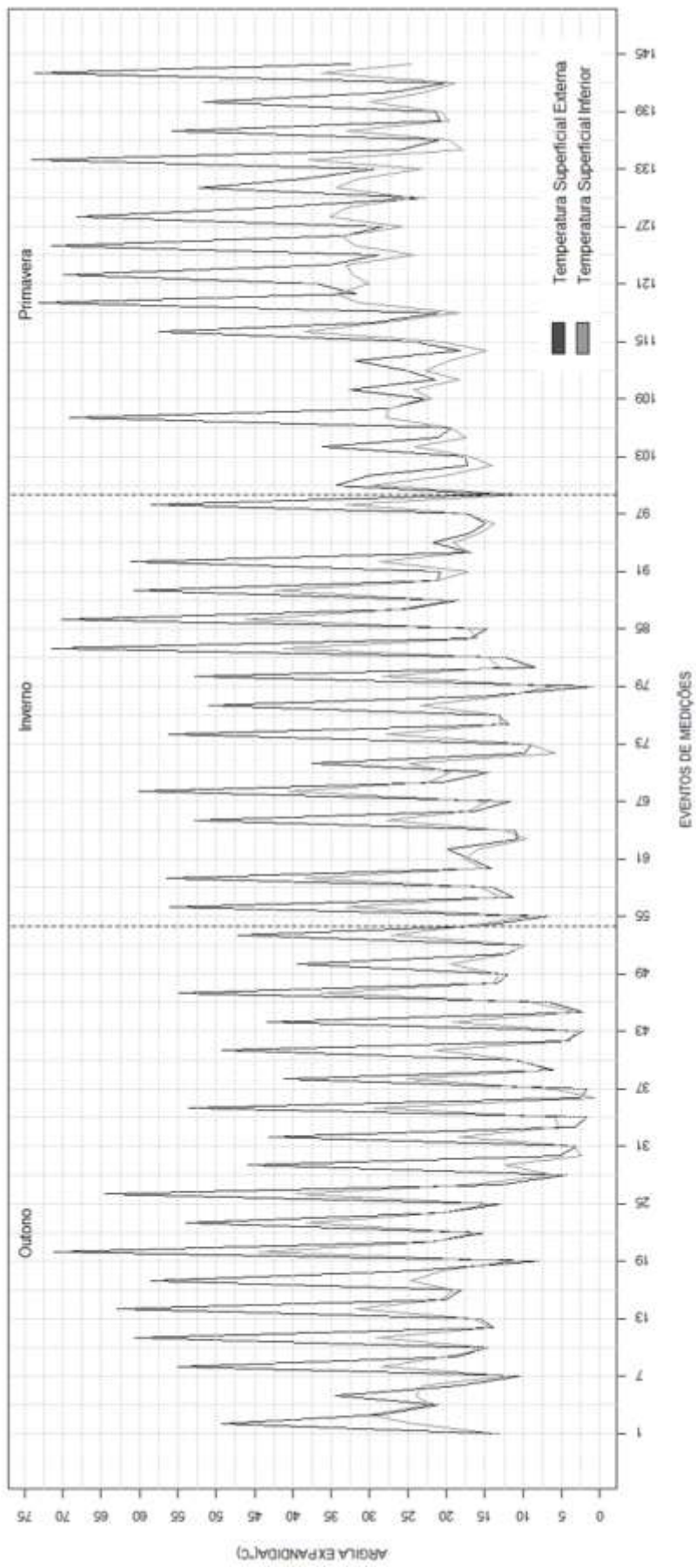
Data: Outubro/ 2018

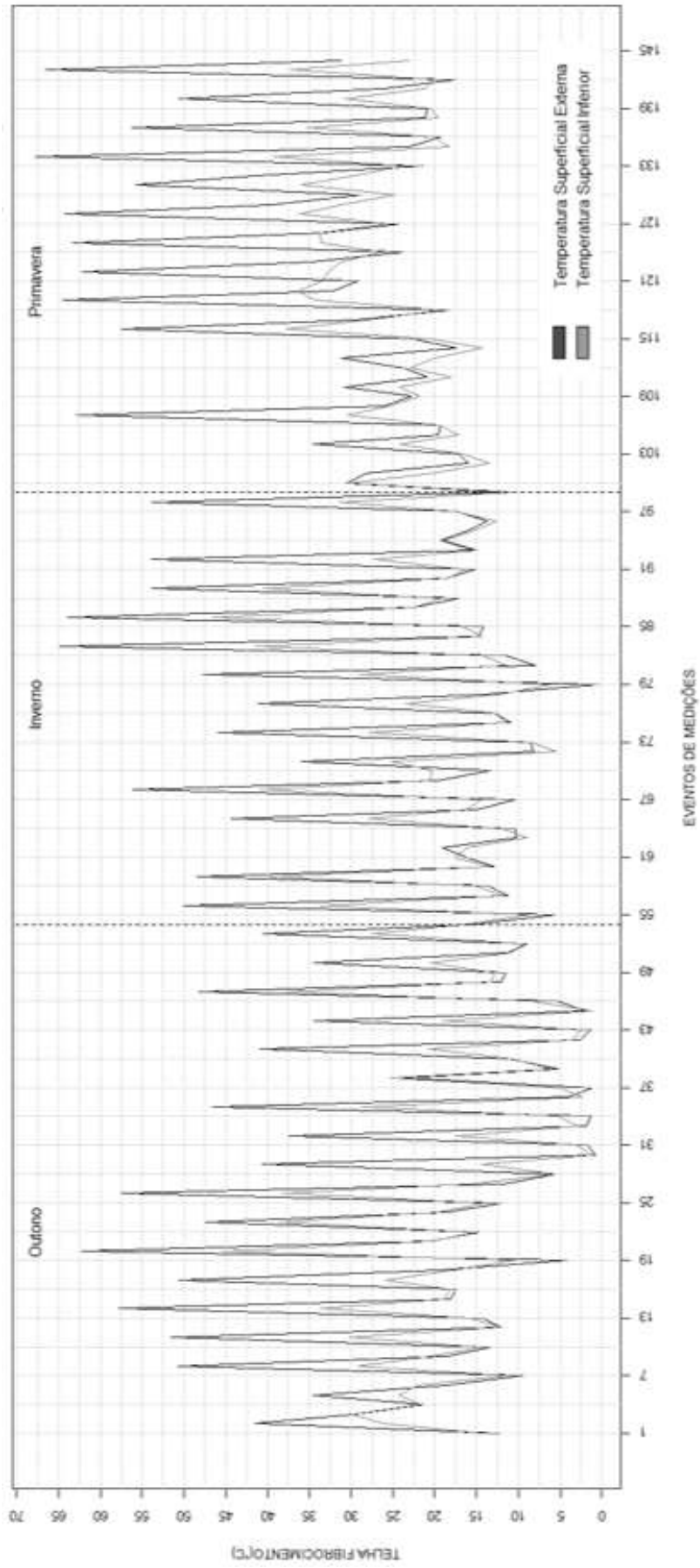
Escala: 1/25

Prancha: 05/05

APÊNDICE B – GRÁFICOS DE TEMPERATURA EXTERNA E INTERIOR







APÊNDICE C – TABELA DE TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS

As medições de temperaturas superficiais máximas e mínimas de cada cobertura, nos horários e estações estabelecidas podem ser analisadas na tabela 14.

Tabela 14 – Temperaturas superficiais externas e inferiores extremas por estação.

		Telhado Verde (°C)			Argila Expandida (°C)			Telha Fibrocimento (°C)		
		7h	12h	18h	7h	12h	18h	7h	12h	18h
Outono	Temp. externa máxima	21,1	51,5	27,5	21,1	71,2	28,6	21,3	62,3	29,6
	Temp. externa mínima	3,8	28,6	2,6	1,6	34,5	2,2	1,1	23,6	0,8
	Temp. inferior máxima	22,5	38,7	29,8	22,1	44,4	30,0	21,7	45,4	29,9
	Temp. inferior mínima	4,3	13,1	0,8	3,2	12,5	0,6	2,5	14,4	1,1
Inverno	Temp. externa máxima	20,7	53,8	20,8	21,9	71,4	25,6	19,3	65,0	22,4
	Temp. externa mínima	5,0	16,6	8,2	0,8	17,0	8,4	0,5	16,2	7,9
	Temp. inferior máxima	19,8	45,3	24,3	19,6	46,3	26,1	20,3	46,6	22,5
	Temp. inferior mínima	7,0	15,8	5,6	6,0	15,7	5,8	6,2	15,5	5,4
Primavera	Temp. externa máxima	33,3	51,7	31,4	36,8	74,1	43,8	30,6	67,8	39,6
	Temp. externa mínima	18,1	23,9	15,8	17,5	30,1	17,3	17,1	28,2	16,0
	Temp. inferior máxima	29,3	36,7	34,2	30,1	38,5	34,5	33,5	39,3	36,3
	Temp. inferior mínima	17,5	19,0	14,3	16,9	19,6	14,0	16,6	20,0	13,5

A tabela resume os dados coletados e mostra temperaturas extremas das coberturas pesquisadas para melhor análise. Entretanto os dados acima não são específicos de um determinado dia, são dados aleatórios. Desta forma, para elaboração da tabela 14 foram considerados todo o período da estação. Podem haver, portanto, algumas divergências de interpretação se estes dados forem comparados com as figuras 38, 39 e 40, que analisam o comportamento térmico de cada evento.

ANEXOS – DADOS METEREOLÓGICOS DE 2007 A 2014

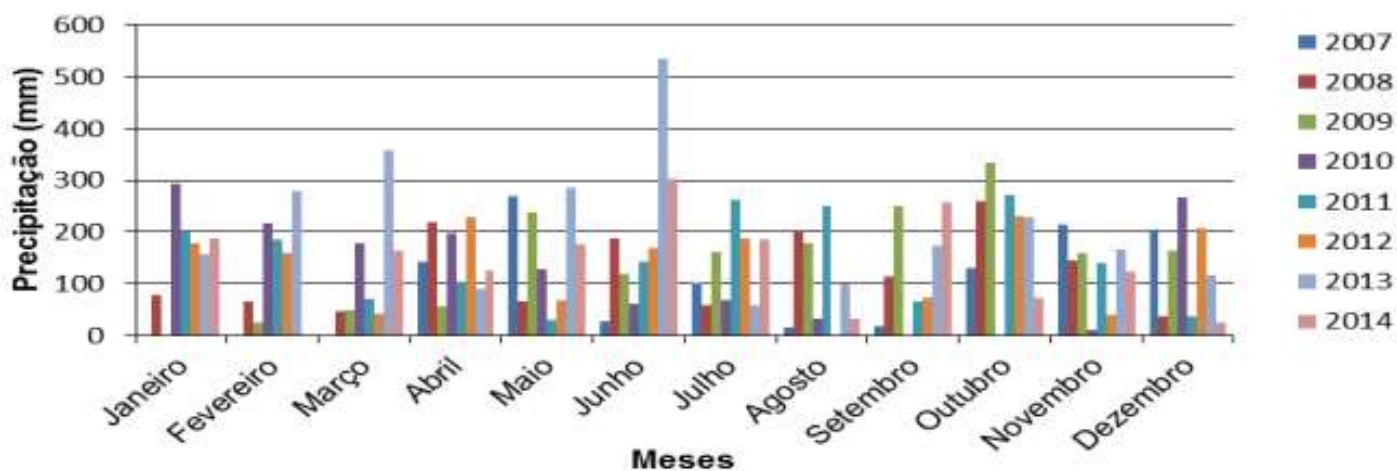


Figura 40 - Dados de precipitação de 2007 a 2014.
Fonte: Rankrape et al (2015)

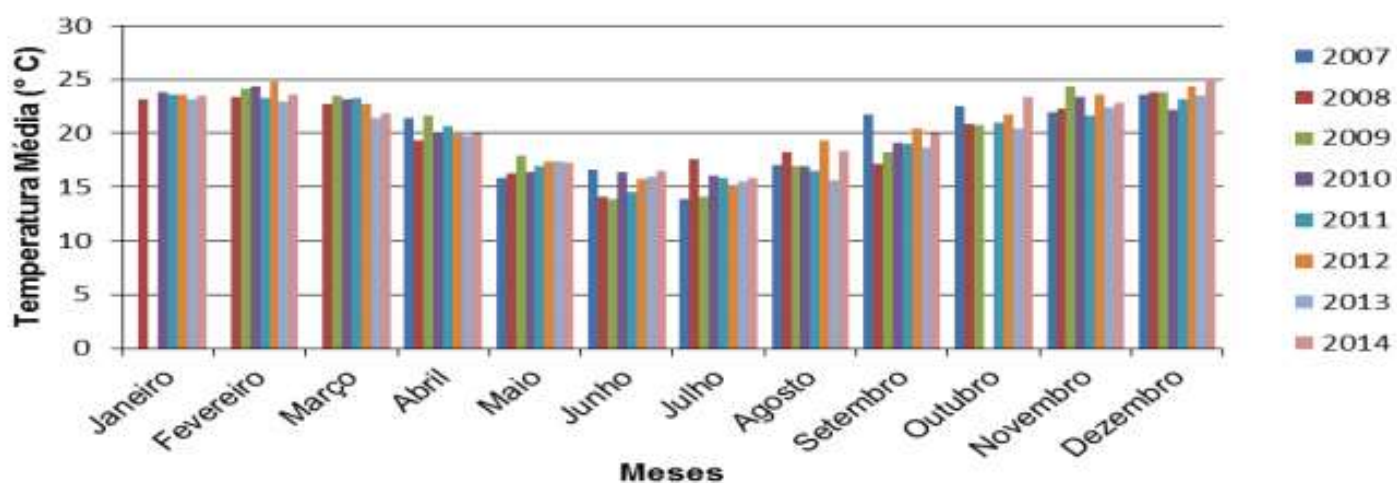


Figura 41 - Dados de precipitação de 2007 a 2014.
Fonte: Rankrape et al (2015)

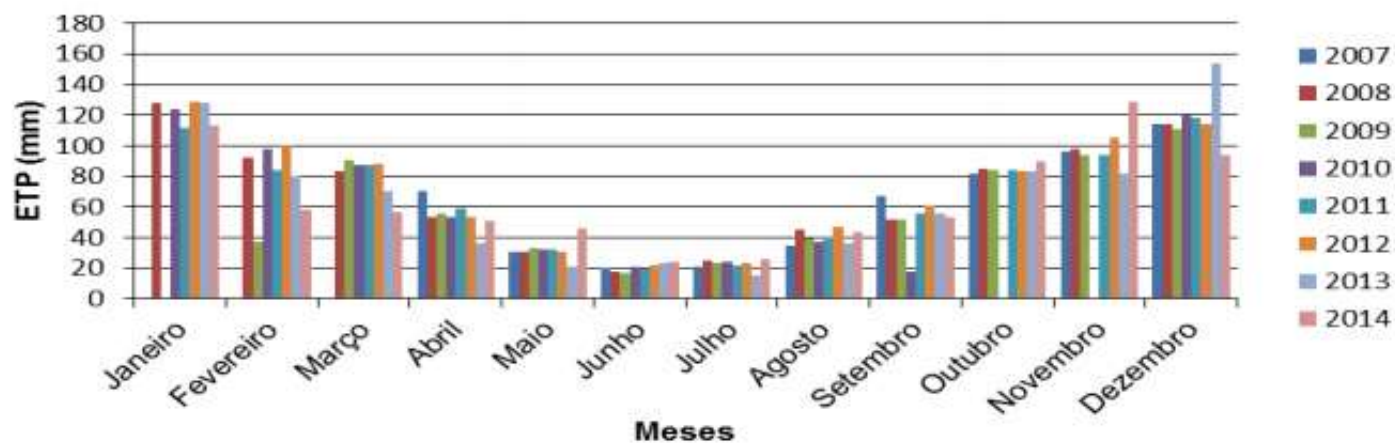


Figura 42 - Dados de evapotranspiração potencial de 2007 a 2014.
 Fonte: Rankrape et al (2015)