

RAFAEL PERUSSI

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE COBERTURA
VERDE: UM EXPERIMENTO UTILIZANDO PLATAFORMAS DE
TESTE**

**Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos, da Universidade de
São Paulo, para obtenção do título de Mestre
em Ciências da Engenharia Ambiental.**

Orientador: Professor Associado Francisco A. S. Vecchia

**São Carlos – SP
2016**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

P471c Perussi, Rafael
COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE COBERTURA
VERDE: UM EXPERIMENTO UTILIZANDO PLATAFORMAS DE TESTE /
Rafael Perussi; orientador Francisco Arthur da Silva
Vecchia. São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Ciências da Engenharia
Ambiental -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2016.

1. Cobertura verde. 2. Telhado verde. 3.
Comportamento térmico. 4. Climatologia. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **RAFAEL PERUSSI**.

Título da dissertação: "Comportamento térmico de um sistema de cobertura verde: um experimento utilizando plataformas de teste".

Data da defesa: 30/09/2016.

Comissão Julgadora:

Prof. Associado **Francisco Arthur da Silva Vecchia**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Paulo Henrique de Souza**
(Universidade Federal de Alfenas/UNIFAL)

Prof. Dr. **Érico Masiero**
(Universidade de Araraquara/UNIARA)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:

Prof. Associado **Frederico Fabio Mauad**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais,
pelo apoio e carinho em todos os momentos.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Assoc. Francisco Vecchia, pela oportunidade e confiança em mim depositada para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Adriano Rogério Bruno Tech, pelo auxílio e esclarecimentos durante as etapas fundamentais da pesquisa.

Aos amigos do Núcleo de Climatologia Aplicada ao Meio Ambiente, pelo companheirismo e apoio em todos os momentos desta trajetória.

Aos técnicos da Estação Climatológica do CRHEA, Roberto (Betão) e André e do Laboratório de Geotecnia da EESC, Oscar Neto, pelo importante auxílio no desenvolvimento do trabalho.

Aos funcionários José Luiz e Nelson, pelo auxílio com as questões burocráticas da secretaria e ao Sr. Rogério, pela ajuda com a preparação da área de trabalho.

Às empresas Maccaferri do Brasil Ltda e Ibaplac, pela colaboração com doações de materiais para a construção das plataformas.

À CAPES, pelo apoio à esta pesquisa através da concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

PERUSSI, R. 2016. **Comportamento térmico de um sistema de cobertura verde: um experimento utilizando plataformas de teste.** 88 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

A utilização de coberturas verdes nas edificações traz vantagens como a regulação das temperaturas no ambiente construído, a melhora na eficiência energética, a retenção das águas pluviais, a atenuação dos efeitos das ilhas de calor e o aumento da biodiversidade no ambiente urbano. O objetivo desta pesquisa é analisar experimentalmente o comportamento térmico de um sistema extensivo de cobertura verde em comparação com uma cobertura controle sem vegetação no período de transição entre as estações primavera-verão. O experimento foi composto por duas plataformas de teste construídas de forma a reproduzir um sistema de cobertura verde extensivo, sendo que uma plataforma recebeu o plantio de grama-amendoim e a outra foi mantida sem cobertura vegetal. Foram monitoradas as temperaturas dos níveis superior e inferior do substrato e também as temperaturas externas, abaixo da base das plataformas, por meio de termopares instalados em locais pré-determinados conectados a um sistema de aquisição de dados. Os dados de radiação solar global e das principais variáveis climáticas foram registrados pela estação meteorológica automática do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA) da Universidade de São Paulo (USP) em Itirapina-SP, local onde foi conduzido o estudo. As análises do comportamento térmico foram realizadas a partir das abordagens espacial e temporal da Climatologia Dinâmica como forma de conhecer a influência das flutuações do tempo meteorológico possibilitando a identificação de episódios climáticos e suas repercussões sobre os valores das temperaturas obtidas das plataformas de teste através da elaboração e análise de gráficos, com o auxílio das cartas sinóticas e imagens de satélite, para identificação do episódio representativo e escolha dos dias típicos experimentais. Os resultados indicaram que a cobertura verde apresentou melhor desempenho térmico em relação à cobertura controle por ter apresentado maior atraso térmico entre as superfícies superior e inferior, menor amplitude térmica nas superfícies e temperaturas máximas menores do que a temperatura máxima do ar. Concluiu-se que, para um dia quente e seco, a cobertura do substrato com uma camada densa de vegetação influencia os processos de troca de calor no perfil do substrato pelo bloqueio de parte da radiação solar incidente, fator principal que determina esses processos, permitindo que a superfície superior não atinja temperaturas acima da temperatura máxima do ar diária e também que esta temperatura se manifeste com maior atraso na superfície inferior.

Palavras-chave: Cobertura verde, Telhado verde, Comportamento térmico, Climatologia.

ABSTRACT

PERUSSI, R. 2016. **Thermal behavior of a green roof system: an experiment using test platforms.** 88 p. Dissertation (M.Sc.). São Carlos Engineering School, University of São Paulo, São Carlos, 2016.

The use of green roofs in buildings brings advantages such as the regulation of temperatures in the built environment, the improvement in energy efficiency, storm water retention, mitigating the heat islands effect and increasing biodiversity in the urban environment. The aim of this study is to analyze experimentally the thermal behavior of an extensive green roof system compared to a control roof with just soil layer in spring-summer transition period. The experiment consisted of two test platforms built to reproduce an extensive green roof system, one of which was planted with perennial peanut and the other one was kept without vegetation. The temperatures of the upper and lower levels of the substrate and also external temperatures below the base of the platforms were monitored by means of thermocouples installed in predetermined locations connected to a data acquisition system. Global solar radiation data and the main climatic variables were recorded by the automatic weather station at the Centre for Water Resources and Environmental Studies (CRHEA), University of São Paulo (USP) in Itirapina-SP, where the study was conducted. The analysis of the thermal behavior was based on the spatial and temporal approaches of dynamic climatology to know the influence of weather fluctuations enabling the identification of climatic episodes and their impact on the temperature values obtained from the test platforms by means of charts and verified by synoptic maps and satellite imagery for the identification of the representative episode and choice of the typical experimental days. The results indicated that green roof showed better thermal performance compared to control coverage by having larger thermal lag between the upper and lower surfaces, the lower temperature range on surfaces and lower maximum temperatures than the maximum air temperature. It was concluded that for a hot, dry day, a layer of a dense vegetation cover influences the heat exchange process in the substrate layer by blocking a part of the solar radiation, the main factor that determines these processes, allowing the upper surface does not reach temperatures above the maximum daily air temperature and also that this temperature be registered with higher delay at the bottom surface.

Keywords: Green roof, Green rooftop, Thermal behavior, Climatology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração representativa dos Jardins Suspensos da Babilônia. Fonte: Clayton e Price (1989).	20
Figura 2: Um telhado verde tradicional na Islândia. Fonte: Milek (2012).	20
Figura 3: Inclinações adotadas para coberturas verdes extensivas entre 0° e 40°. Fonte: Minke (2003).	24
Figura 4: Cobertura verde plana, Ford Motor Company, Michigan. Fonte: Greenroof.com (2016).	24
Figura 5: Cobertura verde inclinada. Fonte: IGRA b (2016).	25
Figura 6: Camadas da estrutura de uma cobertura verde. Fonte: Columbia (2016).	25
Figura 7: Sistema modular pré-vegetado. Fonte: Sedum (2016).	26
Figura 8: <i>Arachis pintoi</i> em floração. Fonte: Arquivo do autor.	31
Figura 9: Localização espacial do Município de Itirapina e imagem de satélite indicando a localização do CRHEA. Fonte: adaptado de IBGE e Google Earth (2016).	48
Figura 10: Estação climatológica e canteiro experimental do CRHEA com a indicação do local do experimento. Foto: Eduardo Fraccaroli, 2015.	49
Figura 11: Construção das plataformas de teste. Fonte: Arquivo do autor.	50
Figura 12: Aplicação da membrana de PEAD. Fonte: Arquivo do autor.	51
Figura 13: Geocomposto estruturado. Fonte: Arquivo do autor.	52
Figura 14: Elaboração do substrato para o preenchimento das plataformas. Fonte: Arquivo do autor.	52
Figura 15: Preenchimento das plataformas com substrato. Fonte: Arquivo do autor.	53
Figura 16: (A) Plantio das mudas no dia 08/08/2015; (B) a cobertura vegetal após 7 semanas.	55
Figura 17: Termopar tipo T. Fonte: Arquivo do autor.	56
Figura 18: (A) Datalogger e multiplexador com a conexão dos termopares; (B) datalogger junto às plataformas de teste. Fonte: Arquivo do autor.	57
Figura 19: (A) Representação com a indicação do posicionamento dos sensores superiores e inferiores no substrato; (B) do sensor externo nas plataformas e (C) corte mostrando o posicionamento dos sensores. Fonte: Arquivo do autor.	59
Figura 20: Posicionamento dos sensores superiores: (A) na cobertura verde, (B) na cobertura controle e (C) inferiores das plataformas. Fonte: Arquivo do autor.	60
Figura 21: Análise rítmica do período de 15 a 21/10/2015 com as principais variáveis climáticas. Fonte: arquivo do autor.	63

Figura 22: Imagens do satélite e cartas sinóticas mostrando a atuação das massas de ar: (A) 16/10/2015 e (B) 20/10/2015. Fonte: Arquivo do autor.....	64
Figura 23: Gráficos da variação da temperatura do ar nos dias 16 e 20 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.	65
Figura 24: Gráficos da radiação solar global máxima nos dias 16 e 20 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.	66
Figura 25: Gráficos dos valores das temperaturas do ar, das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma verde no dia 16 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.....	67
Figura 26: Gráficos dos valores das temperaturas do ar, das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma controle no dia 16 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.....	67
Figura 27: Gráficos dos valores de temperatura das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma verde e a radiação solar global máxima no dia 16 de outubro.....	69
Figura 28: Gráficos dos valores de temperatura das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma controle e a radiação solar global máxima no dia 16 de outubro.....	69
Figura 29: Gráficos dos valores das temperaturas do ar, das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma verde no dia 20 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.....	70
Figura 30: Gráficos dos valores das temperaturas do ar, das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma controle no dia 20 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.....	71
Figura 31: Gráficos dos valores de temperatura das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma verde e a radiação solar global máxima no dia 20 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.....	72
Figura 32: Gráficos dos valores de temperatura das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma controle e a radiação solar global máxima no dia 20 de outubro.....	73
Figura 33: Gráficos dos valores das temperaturas do ar e da superfície externa das plataformas verde e controle no dia 16 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.	75
Figura 34: Gráficos dos valores das temperaturas do ar e da superfície externa das plataformas verde e controle no dia 20 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição física e química do substrato	54
Tabela 2: Valores da temperatura máxima e mínima do ar e a amplitude térmica para os dias 16 e 20 de outubro.	65
Tabela 3: Valores e respectivos horários da temperatura máxima, mínima e a amplitude térmica do ar, das superfícies superiores e inferiores e dos sensores externos das plataformas verde e controle no dia 16 de outubro.	68
Tabela 4: Valores e respectivos horários da temperatura máxima, mínima e a amplitude térmica do ar, das superfícies superiores e inferiores e dos sensores externos das plataformas verde e controle no dia 20 de outubro.	71
Tabela 5: Temperaturas das superfícies superior, inferior e externa da plataforma verde no horário da máxima temperatura da superfície inferior nos dois dias experimentais.	74
Tabela 6: Temperaturas das superfícies superior, inferior e externa da plataforma controle no horário da máxima temperatura da superfície inferior nos dois dias experimentais.	74

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	38
Equação 2.....	38
Equação 3.....	39
Equação 4.....	61

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASAS – Alta subtropical do Atlântico Sul.

FLL – Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau.

IAC – Instituto Agronômico de Campinas.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

mEc – Massa Equatorial Continental.

mPa – Massa Polar Atlântica.

mTa – Massa Tropical Atlântica.

mTc – Massa Tropical Continental.

θ CI – Temperatura Controle Inferior.

θ CS – Temperatura Controle Superior.

θ C Ext – Controle Externo.

θ VI – Temperatura Verde Inferior.

θ VS – Temperatura Verde Superior.

θ V Ext – Verde Externo.

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul.

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔT – Amplitude térmica.

Δs_i – Amplitude Superior Interna.

Δs_e – Amplitude Superior Externa.

σ – Constante de Stefan-Boltzman.

ε – Emissividade.

φ – Atraso térmico.

μ - Amortecimento térmico.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos	18
3 COBERTURAS VERDES	19
3.1 Definição	19
3.2 Histórico e evolução	19
3.3 Tipos de coberturas verdes	22
3.3.1 Cobertura verde extensiva.....	22
3.3.2 Cobertura verde intensiva	23
3.4 Componentes do sistema	25
3.4.1 Impermeabilização e proteção anti-raiz	26
3.4.2 Drenagem	27
3.4.3 Substrato	28
3.4.4 Vegetação.....	29
3.5 Benefícios	31
3.5.1 Eficiência energética.....	31
3.5.2 Controle da temperatura.....	32
3.5.3 Prolongamento da vida útil da cobertura	33
3.5.4 Retenção das águas pluviais.....	33
3.5.5 Proteção contra incêndios	33
3.5.6 Proteção acústica.....	34
3.5.7 Aumento do espaço útil	34
3.5.8 Redução das ilhas de calor	35
3.5.9 Contribuição à biodiversidade	35
3.5.10 Benefícios estéticos e sociais	36
3.6 Manutenção	36
3.7 Desempenho térmico	37
3.7.1 Transferência de calor.....	37
3.7.2 Comportamento térmico	40
3.7.2.1 Condutividade térmica	41
3.7.2.2 Inércia térmica	42
3.7.3 Revisão da literatura	43
4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	47
4.1 Delineamento experimental.....	47
4.1.1 Caracterização da área de estudo	47

4.1.2 Construção das plataformas de teste	49
4.1.3 Impermeabilização	50
4.1.4 Drenagem	51
4.1.5 Substrato	52
4.1.6 Seleção da espécie vegetal	54
4.2 Irrigação.....	56
4.3 Instrumentação e aquisição dos dados.....	56
4.4 Análise dos valores de temperatura	60
4.5 Análise estatística	60
4.6 Análise episódica dos tipos de tempo.....	61
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
5.1 Análise do período de coleta	62
5.2 Análise dos dados das plataformas verde e controle	66
6 CONCLUSÃO	77

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A crescente atenção dada às questões ambientais e a consequente busca de um desenvolvimento sustentável por parte das sociedades atuais têm acentuado as preocupações relacionadas aos impactos associados à transformação do ambiente natural em ambiente construído. Estes tipos de preocupações surgem como consequência da expansão dos grandes centros urbanos que, ao aumentar em área e em densidade populacional, aumentam a concentração de estruturas construídas e reduzem os seus espaços verdes, provocando uma maior pressão nos recursos naturais existentes, a perda de biodiversidade e a diminuição da qualidade de vida dos seus habitantes (SANTOS, 2012).

As cidades mais compactas, ou cujo planejamento não contemplou as áreas verdes, não conseguem se beneficiar das vantagens desses espaços. Uma das soluções para este problema parte do melhor aproveitamento das coberturas dos edifícios, adicionando-lhes vegetação, aumentando assim a área verde urbana, a qual permitirá usufruir de todas as vantagens que lhe estão associadas, como a regulação da temperatura do ambiente interno, o atraso no escoamento das águas pluviais e o aumento da vida útil da estrutura da cobertura (SUSCA et al., 2011).

As edificações são construídas principalmente para promover segurança e proporcionar um ambiente mais adequado às atividades humanas e podem ser consideradas a melhor forma de termorregulação, ou seja, a função destas construções é proteger os indivíduos das intempéries a que estão sujeitos, mantendo em seu interior uma proteção contra os rigores do clima. Nesse sentido, o principal requisito às edificações é promover o menor estresse térmico aos usuários (OKE, 1987).

O processo lógico da construção moderna é trabalhar com as forças da natureza e não contra elas, com o intuito de aproveitar suas potencialidades para concepção de ambientes mais adequados ao conforto humano (OLGYAY, 1998), levando também em consideração os fatores condicionantes do clima, como topografia, localização geográfica, cobertura vegetal, entre outros, que podem influenciar na orientação da implantação do projeto, na volumetria da edificação e na seleção dos materiais utilizados na construção, em busca dessa a concepção do melhor ambiente aos usuários.

Condições climáticas consideradas satisfatórias, segundo os parâmetros bioclimáticos de conforto ambiental, são muito raras, no entanto, é possível conceber espaços mais coerentes às necessidades físicas e psicológicas pressupostas pelas zonas de conforto (FREITAS, 2005), com baixo custo de manutenção e reduzindo o condicionamento térmico artificial.

Existe uma extensa disposição de tecnologias e soluções projetuais em relação às construções das coberturas verdes. Algumas dessas informações foram desenvolvidas por

instituições privadas, todavia, atualmente, instituições públicas e universidades também estão conduzindo pesquisas na área, que apresentam importantes informações sobre este sistema construtivo. Os estudos são em relação às plantas e substratos utilizados, bem como sobre o comportamento das coberturas verdes nas várias escalas de abordagem (KANE, 2004).

Uma das vantagens que a cobertura verde proporciona é a atenuação das temperaturas nos ambientes internos às edificações devido ao efeito de inércia térmica, referente aos elementos do sistema construtivo. Assim, ocorre um atraso na transmissão do fluxo de calor proveniente da radiação solar, na qual as máximas temperaturas registradas no interior da edificação acontecem quando a temperatura do ar externo é menor do que a temperatura do ar interno (LOPES, 2007).

Neste sentido, fica evidente a importância do conhecimento das condições climáticas, pois podem inferir em padrões de ocupação territorial, na concepção de projetos arquitetônicos, e até mesmo auxiliar em processos de tomada de decisão em diversos aspectos ambientais (CUNHA; VECCHIA, 2007). O Brasil possui quase que a totalidade de seu território sujeito à intensa insolação durante a maior parte do ano. Por este motivo, a cobertura deveria ser o elemento com maior proteção térmica.

A abordagem climática adotada para definir o período de análise dos dados meteorológicos e dos valores monitorados, baseia-se nos critérios da Climatologia Dinâmica. Nessa perspectiva, entende-se o clima como o encadeamento sucessivo e contínuo dos estados atmosféricos e suas articulações, no sentido de retorno aos mesmos estados, oferecendo, em um curto intervalo de tempo, subsídios para o entendimento das condições climáticas. Assim, compreende-se a ação das massas de ar sobre uma determinada região, bem como suas repercussões no ambiente construído (SEIXAS, 2015).

De acordo com Vecchia (1997), na abordagem dinâmica, o que diferencia os episódios são a intensidade e duração de cada massa de ar sobre o local. Para isso, a coleta dos dados de radiação solar global e dos elementos do clima é de fundamental importância para análise dos processos atmosféricos que acontecem de forma sucessiva, encadeada e inter-relacionada, configurando o ritmo climático, sem deixar de considerar os fatores geográficos de modificação. Após a análise do episódio representativo do fato climático, pode-se eleger um dia representativo das ocorrências climáticas para visibilidade do objeto de estudo.

Portanto, a utilização correta da climatologia dinâmica depende da visualização dos encadeamentos de tipos de tempo atmosférico, a partir de respostas locais colhidas por meio das variações diárias e horárias dos elementos do clima (medições em superfície, por meio de estações e postos meteorológicos) e das imagens fornecidas por satélites meteorológicos. Entretanto, o simples acesso a esse banco de dados não é suficiente. Faz-se necessária a

correta interpretação dos valores para o real entendimento dos processos atmosféricos (VECCHIA, 1997).

No Brasil, a maioria dos estudos, relativos às coberturas verdes, aborda a retenção das águas pluviais pelos sistemas e ao conforto térmico proporcionado, utilizando protótipos de alvenaria em escala. Dito isto, verifica-se que não há muitos estudos que envolvam a análise do comportamento térmico somente desses sistemas de cobertura isoladamente tendo a finalidade de verificar a reação do conjunto planta-substrato frente ao calor.

Nesse contexto, o presente trabalho buscou mensurar o quanto a presença da vegetação, em uma cobertura verde extensiva, contribui com a redução das oscilações da temperatura no perfil do substrato frente à ação da radiação solar e às oscilações da temperatura do ar, comparado a uma cobertura sem vegetação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente estudo propôs avaliar o comportamento térmico de um sistema extensivo de cobertura verde e, também, comparar o comportamento térmico com uma cobertura controle sem vegetação construídos sobre plataformas de teste, no período de transição primavera-verão, em uma região de clima tropical de altitude no Estado de São Paulo, visando a aplicação em sistemas construtivos.

2.2 Objetivos específicos

- Dimensionamento das plataformas de teste;
- Análise climática para definição do episódio representativo;
- Verificação da distribuição e consistência de dados de temperaturas superficiais;
- Análise do comportamento térmico de um sistema extensivo de cobertura verde;
- Análise da influência da cobertura vegetal nos valores de temperatura do substrato em comparação com uma cobertura sem vegetação.

3 COBERTURAS VERDES

3.1 Definição

As coberturas verdes são sistemas construtivos utilizados na cobertura de edificações, que consiste na sobreposição de diversas camadas sobre uma superfície estrutural, as quais de modo geral incluem: membrana a prova de água (impermeabilização), sistema de drenagem, substrato (meio de crescimento da vegetação) e plantas. Esse sistema construtivo pode ser parte de uma produção pré-fabricada ou cada camada pode ser instalada separadamente na obra, o que é definido com base nos objetivos e restrições de cada projeto.

Coberturas construtivas são consideradas como telhados verdes quando apresentam uma porção substancial de sua superfície permanentemente coberta por vegetação. Em geral, os telhados verdes atuais são formados por diversas camadas sobrepostas sobre um suporte estrutural, contendo vegetação tolerante às condições do ambiente, solo de espessura variável, material drenante, barreira contra raízes e componente impermeabilizante (DUNNETT; KINGSBURY, 2008). Segundo Osmundson (1999), uma cobertura verde é qualquer espaço aberto, plantado, com o propósito de proporcionar satisfação ao homem e melhorias ambientais, e que seja separado do solo por uma edificação ou qualquer outra estrutura.

A denominação desse sistema construtivo, atualmente, varia em diversas regiões, sendo descrito como telhado verde (DUNNETT; KINGSBURY, 2008; DURHMAN et al., 2007; PLEDGE, 2005), telhado vegetado (EMILSSON, 2005) ou cobertura verde leve (CVL) (VECCHIA, 2005).

3.2 Histórico e evolução

Relatos históricos indicam o surgimento do uso de telhados verdes como prática construtiva comum há centenas ou talvez milhares de anos (PECK et al., 1999). Na literatura, a origem dessa prática se relaciona a diversas civilizações pioneiras, entre elas, a mais interessante, localizada na região da Mesopotâmia, nas margens do rio Eufrates, durante o reinado de Nabucodonosor, rei que supostamente teria ordenado, há 600 a. C., uma grande construção feita de pedras, recriando uma montanha artificial, pensando provavelmente em uma maneira de integrar a natureza ao ambiente construído, pretendendo, desta forma, amenizar a nostalgia de sua esposa Semiramis, nascida ao norte do país, lugar montanhoso e repleto de florestas. Este lugar ficou conhecido como Jardins Suspensos da Babilônia (Figura 01), considerado uma das sete maravilhas do mundo antigo e que cobria uma área de 2000m² com árvores, arbustos e trepadeiras (DINSDALE; PEAREN; WILSON, 2006).



Figura 1: Ilustração representativa dos Jardins Suspensos da Babilônia. Fonte: Clayton e Price (1989).

De acordo com Minke (2003), na Islândia tinha-se a tradição de construir coberturas com duas ou três camadas de esterco com carvão vegetal e depois sobrepor grossos rolos de grama (Figura 02). Apesar da cobertura não ser impermeável, sua inclinação era suficiente para não infiltrar água, nem da chuva e nem da neve ao derreter. Já a tradicional cobertura de gramínea da Escandinávia possui uma inclinação entre 30° e 45° graus, na qual uma camada grossa de turfa (matéria orgânica em decomposição) com grama é colocada sobre várias camadas de cortiça. Quando impermeabilizada, a cortiça é bem resistente à decomposição, à passagem de raízes e à infiltração. A vida útil de uma cobertura dessas é de aproximadamente vinte anos.



Figura 2: Um telhado verde tradicional na Islândia. Fonte: Milek (2012).

São encontrados exemplares de coberturas verdes datados de diversas épocas em culturas diferentes e, por vezes, não correlacionadas, por exemplo, em países frios como Escandinávia, Islândia e Rússia, assim como em países de clima quente como a Tanzânia, além de cidades como Pompéia e outras cidades importantes do Império Romano e, posteriormente, no período renascentista italiano, quando os tetos com vegetação eram comuns na cidade de Gênova. No período pré-colombiano também existiam em outros países, como no México. Durante os séculos XVI e XVII, a Índia e algumas cidades espanholas já havia também coberturas com vegetação. A partir do século XVIII começaram a surgir em algumas cidades francesas (DE LORME, 1996; PECK et al, 1999).

Somente com a descoberta de materiais mais resistentes e duráveis para a criação de abrigos modernos, como o concreto, em meados do século XVIII, foi possível modificar a arquitetura tradicional e expandir o uso de telhados verdes em algumas regiões da Europa e da América do Norte, onde foram usados largamente por simples razões de complementação estética nas edificações, devido à preocupação sobre a degradação da qualidade do ambiente urbano e a redução de áreas verdes (DUNNETT; KINGSBURY, 2008; PECK et al., 1999).

Le Corbusier, conceituado arquiteto francês do século XX, começou a usar as coberturas verdes de uma forma mais sistemática ao concretizar um largo número de projetos cujos telhados eram preenchidos por jardins acessíveis aos seus habitantes, somando assim a componente estética valorizada anteriormente, por Frank Lloyd Wright, a uma componente mais funcional (MACIEL, 2002; HENEINE, 2008). Foram os desenhos desses arquitetos, que constituíram uma das bases em termos de estrutura e design para o uso de coberturas ajardinadas.

Nas décadas de 60 e 70, verificou-se uma evolução significativa nas tecnologias ligadas à construção de coberturas verdes em vários países, em especial na Suíça e Alemanha. Em 1977, com a criação da Sociedade Alemã de Pesquisa da Paisagem, Desenvolvimento e Construção, FLL, uma organização alemã ligada à paisagem e construção (FLL, 2002), em conjunto com algumas universidades alemãs, iniciou-se o desenvolvimento da pesquisa ligada aos diferentes componentes destas coberturas, nomeadamente de material anti-raiz, membranas impermeáveis, sistemas de drenagem de águas pluviais, substratos e vegetação (PECK et al., 1999). Foi a partir desta data e através destes estudos que as coberturas começaram a serem vistas com rigor científico e como produto com potencial econômico (CORREA, 2001; MORAN, 2004).

Na Alemanha, o desenvolvimento do mercado para comercialização e construção de coberturas verdes expandiu-se rapidamente nos anos 80, calculando em média um crescimento anual de 15% a 20%. No ano de 1989, um milhão de m² em coberturas verdes já existiam no país e, em 1996, esse número passou para 10 milhões de m². Este crescimento foi

estimulado, em sua maior parte, pelas políticas públicas do estado e por programas de incentivos fiscais. Outros lugares como Viena e Áustria também forneceram subsídios e estabeleceram programas de incentivos fiscais para o desenvolvimento das coberturas verdes em três estágios de projeto: planejamento, construção e manutenção, garantindo inclusive três anos de apoio aos proprietários. Esse interesse renovado deve-se, principalmente, ao rápido declínio dos espaços verdes nas áreas urbanas de intenso desenvolvimento populacional e, conseqüentemente, à perda dos benefícios que estes espaços proporcionam ao ambiente construído (PECK et al., 1999).

No Brasil, a prática construtiva de telhados verdes e terraços verdes começou a ser realizada pelo arquiteto e paisagista Roberto Burle Marx, no final da década de 30 do século passado, com projetos deste gênero de terraços nas construções do Ministério da Educação e Cultura do Rio de Janeiro, Museu de Arte Moderna, na Associação Brasileira de Imprensa e em edifícios da Petrobras, ambos, também, no Rio de Janeiro (DUNNETT; KINGSBURY, 2008; KÖHLER et al., 2003).

O que se percebe é que, no Brasil, desde a década de 1990, a utilização das coberturas verdes está se expandindo lentamente. Os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul são os mais notórios na aplicação destes sistemas, havendo inclusive, nas capitais destes estados, leis de incentivo à construção de coberturas vegetadas (FERRAZ, 2012).

3.3 Tipos de coberturas verdes

As coberturas verdes com baixa espessura de substrato, ou seja, leves, são denominadas pela literatura como “coberturas verdes extensivas”. Já as coberturas com grande espessura de substrato são denominadas “coberturas verdes intensivas” (ROSENZWEIG; GAFFI; PARSHALL, 2006 apud LOPES, 2007). Os fatores que as distinguem são, sobretudo, o custo que cada uma pode envolver na sua instalação e manutenção, o porte da vegetação e a espessura da camada de substrato.

3.3.1 Cobertura verde extensiva

As coberturas verdes extensivas apresentam substrato com espessura de 0,02 a 0,20 m e o peso pode variar entre 60 e 170 kg/m², requerem pouca irrigação e possuem baixa manutenção (IGRA, 2016; OBERNDORFER et al., 2007). Possuem características de rápida cobertura do substrato pela vegetação e resistência às condições extremas de clima (ampla faixa de tolerância), conjunto de características que sugere menor manutenção após o período de estabelecimento (DURHMAN et al., 2007). Deve-se dar prioridade ao uso de vegetação nativa da região, mais adaptada ao clima local. No geral, os tipos de vegetação mais usados são os musgos, herbáceas, gramíneas e suculentas, dentre estas as do gênero *Sedum sp.*

(ZINCO, 2012). Estas coberturas exercem cargas inferiores nos edifícios se comparado às coberturas intensivas, devido ao menor porte das plantas e à menor quantidade de substrato que é necessário para mantê-las.

3.3.2 Cobertura verde intensiva

Para Johnston e Newton (2004), as coberturas verdes intensivas tradicionais possuem, em sua estrutura básica, algumas características como maior espessura de substrato, sistema de irrigação e condições mais favoráveis para o crescimento das plantas. Essas coberturas podem ser utilizadas como locais de recreação e convivência, permitindo ser incorporadas estruturas como bancos, passeios e até lagos. A manutenção é feita de uma forma individual e, dependendo das espécies, poderá ser necessária a instalação de sistemas adicionais de drenagem e recolha de água, e sistemas de rega e/ou fertilização. Requer maior investimento inicial e manutenção periódica (em função da maior produção de matéria orgânica, crescimento vegetal e diversidade de espécies), além de atribuir maior carga à estrutura construída em comparação ao sistema extensivo (SZOKOLAY, 1998; SANTOS, 2012).

A espessura do substrato deve ser suficiente para acomodar as espécies de maior porte. A maioria dos autores refere que esta espessura terá de ser superior a 0,20m, apresentando algumas diferenças em relação à carga que cada uma tem associada. A IGRA (International Green Roof Association) apresenta valores relativos a todo o sistema da cobertura e não apenas relativamente ao substrato. Segundo esta fonte, as cargas na estrutura giram em torno de 150 a 500 kg/m² para alturas totais que variam entre os 0,15 e 0,40 m, podendo ultrapassar este valor, dependendo da escolha das espécies e a estrutura sobre a qual é instalada. Devido à diversidade que apresentam, coberturas desse tipo favorecem a criação de ecossistemas mais complexos, contribuindo para o aumento da biodiversidade (PECK et al., 1999).

As diferenças de valores, que os estudos referidos apresentam, estão relacionadas, sobretudo, com o tipo de condições locais, sendo o clima o fator mais relevante, pois influenciará no tipo de vegetação a ser utilizado, o qual, por sua vez, condiciona a escolha do substrato.

Segundo Minke (2003), outro parâmetro relevante que caracteriza a escolha do tipo de cobertura (extensiva ou intensiva) de um projeto de telhado verde é a declividade adotada. As declividades comumente utilizadas estão no intervalo de 0° a 40° (0% a 84%) (Figura 03), sendo classificadas como coberturas planas (0°), coberturas com pouca inclinação 3° (5%), coberturas com inclinação moderada 20° (36%) e coberturas muito inclinadas 40° (84%).

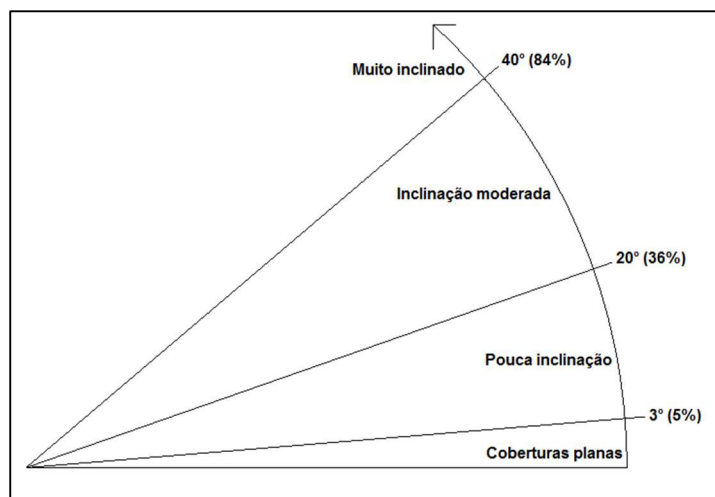


Figura 3: Inclinações adotadas para coberturas verdes extensivas entre 0° e 40°. Fonte: Minke (2003).

As coberturas extensivas podem ser instaladas com inclinações mais elevadas devido ao menor porte da vegetação. De acordo com (PECK et al., 1999), estas coberturas são as mais indicadas para declives de até 30°. De acordo com Minke (2003), a declividade de 3° (5%) é considerada satisfatória economicamente, por não necessitar de sistema de drenagem específico e técnicas de estabilização e contenção de movimentos de substrato, embora, Dunnett e Kingsbury (2008) sugiram uma inclinação mínima em função de escorregamentos de substrato entre 3° (5%) e 9,5° (17%), podendo ser acentuada em até 30° (58%) com a aplicação de sistemas de contenção de movimentos de cargas. As Figuras 04 e 05 mostram sistemas de coberturas verdes planas e inclinadas.



Figura 4: Cobertura verde plana, Ford Motor Company, Michigan. Fonte: Greenroof.com (2016).



Figura 5: Cobertura verde inclinada. Fonte: IGRA b (2016).

3.4 Componentes do sistema

Uma cobertura verde é uma estrutura em camadas. A membrana de impermeabilização fica imediatamente sobre a plataforma estrutural do telhado para evitar a entrada de umidade na edificação. Acima desta membrana, há uma camada de drenagem, a qual é projetada para transportar o excesso de escoamento e, em alguns sistemas, armazena água para as plantas em períodos de seca. Em seguida, uma camada filtrante é instalada para evitar o carregamento de partículas do substrato que comprometam o sistema de drenagem do telhado. Por fim, o substrato e a vegetação completam a cobertura verde (OLIVEIRA, 2012).

A instalação da cobertura verde pode ser feita através de sistema um laminar, onde os componentes das camadas são instalados diretamente no local, ou através de sistemas modulares, com bandejas pré-vegetadas que já possuem as camadas formadas (SEDUM, 2016). As Figura 06 e 07 mostram a disposição das camadas da estrutura de uma cobertura verde e de um sistema modular.



Figura 6: Camadas da estrutura de uma cobertura verde. Fonte: Columbia (2016).

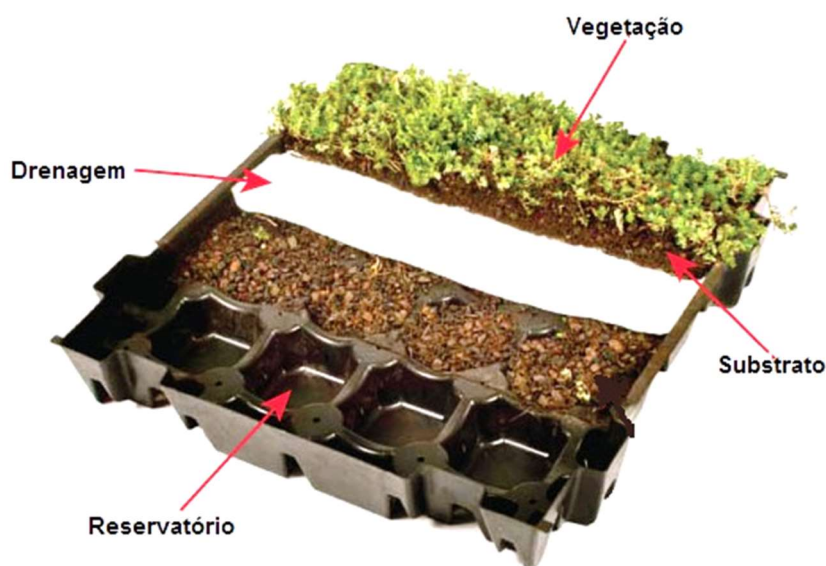


Figura 7: Sistema modular pré-vegetado. Fonte: Sedum (2016).

3.4.1 Impermeabilização e proteção anti-raiz

A camada de impermeabilização possui a função de impedir que a água e o vapor, provenientes da cobertura verde, não entrem em contato com a estrutura que a suporta, por isso é a camada mais importante e dispendiosa de uma cobertura verde. Há uma grande diversidade de membranas à prova de água comercialmente disponíveis, variando entre as mantas poliméricas e os produtos líquidos de fácil aplicação (MARTIN, 2005).

Segundo a publicação do Instituto Brasileiro de Impermeabilização (IBI) (2009), a impermeabilização de telhados verdes deve considerar um grande esforço mecânico, problemas emergentes em caso de incêndio, desgaste pela água, microrganismos, além de possíveis substâncias químicas que se infiltrem pela cobertura plana que se encontra por debaixo de uma cobertura verde. Comumente, são utilizadas membranas impermeabilizantes fabricadas de membranas termoplásticas de policloreto de vinila (PVC), resinas sintéticas e betume modificado, conhecidas sob a forma de manta asfáltica de alumínio ou manta asfáltica de polietileno.

Segundo Wollet e Kimmins (2000), as mantas de PVC são muito utilizadas pela sua praticidade, preço e resistência contra as raízes, embora o PVC promova impactos ambientais, como a liberação de produtos carcinogênicos e irritantes durante a sua fabricação, como também, a baixa capacidade de reciclagem após o seu descarte. Já as resinas sintéticas são polímeros preparados, via polimerização, por diferentes processos químicos, podendo ser aplicados diretamente à superfície desejada, que, por sua vez, sofre uma fixação, formando uma película protetora, gerando o tamponamento dos poros da superfície.

O Instituto Brasileiro de Impermeabilização (IBI) normatiza que a impermeabilização mais indicada para telhados verdes combine armaduras de poliéster com betume modificado,

que é um aglomerante da manta asfáltica, plastomérica ou elastomérica, fabricado pela fusão de betume com feltros orgânicos, gerando um subproduto, no qual são adicionados outros materiais como polímeros - para adquirir flexibilidade, elasticidade e força, podendo ser adicionados outros componentes como alumínio e polietileno, além de aditivos herbicidas em mono ou dupla camada, a fim de inibir a penetração de raízes das plantas na estrutura.

Geralmente, a aplicação de uma membrana impermeabilizante pode garantir a proteção contra umidade sobre o telhado, porém pode sofrer perfuração por raízes, prejudicando o estancamento e causando fissuras as quais podem evoluir para uma patologia construtiva que necessite de intervenções. Segundo Minke (2003), pesquisas sobre impermeabilização em coberturas verdes, realizadas com betume, comprovam que é indispensável uma camada adicional para proteção contra perfuração por raízes. Ressalta-se que a membrana de impermeabilização é atravessada por raízes de distintas plantas, devido a alguns microrganismos que vivem em suas extremidades terem propriedades para dissolver materiais betuminosos.

Para proteger a estrutura de suporte do efeito invasivo das raízes de algumas plantas, é recomendada a aplicação de membranas impermeabilizantes mais resistentes. Esta proteção pode ser constituída por uma camada colocada sobre a membrana de impermeabilização ou estar incorporada a ela. Neste caso, a membrana deve conter um aditivo herbicida que iniba o contato e a perfuração das raízes (CORREA, 2001).

3.4.2 Drenagem

A eficiência da camada de drenagem depende essencialmente dos materiais que a constituem e da inclinação da cobertura. A inclinação mínima exigida para estas coberturas para que o escoamento de água seja eficiente, deve ser de 2%. Para inclinações inferiores a este valor é frequente a ocorrência de colmatação do sistema de drenagem pela acumulação de sedimentos do substrato ao longo dos canais e coletores. Para inclinações superiores a 8%, é necessário implementar um sistema de retenção na cobertura, para evitar que se deem quebras nas ligações das membranas e do sistema de drenagem e mesmo o enrugamento das camadas. (FISHBURN, 2004 apud SANTOS, 2012).

Manter a drenagem adequada em um telhado verde é extremamente importante para o êxito do sistema. Esse procedimento garante a proteção da membrana impermeável da cobertura, além de remover o excesso de água acumulada, evitando a saturação prolongada do solo, que comumente pode causar doenças em plantas, apodrecimento e eventual morte do sistema radicular vegetal (DUNNETT; KINGSBURY 2008). A camada drenante cobre toda a superfície da cobertura e pode constituir-se de sistemas pré-fabricados, como mantas de baixo

peso que direcionam bem o fluxo da água das chuvas, além de já possuírem filtros de geotêxtil não-tecido em sua estrutura (OBERLANDER; WHITELAW; MATSUZAKI, 2002).

Outra opção é a utilização de resíduos de demolição triturados - pedras, tijolos e concreto, por consistirem em alternativa viável para implementação como sistema de drenagem em meio ao substrato, na cobertura verde. Além disso, apresentam benefícios na escala ambiental, pois incluem reaproveitamento de materiais e reduzem a necessidade de transporte e disposição final dos resíduos da construção (GREEN ROOFS, 2016).

3.4.3 Substrato

Numa cobertura verde, a camada de substrato é a camada base para o desenvolvimento da vegetação. O tipo e a espessura do substrato determinam o desenvolvimento das plantas e o peso do sistema na estrutura. O cultivo de plantas em substratos elaborados implica que estas terão que desenvolver as suas raízes num volume limitado, mas para que isso aconteça, é necessário ter em conta a sua capacidade de retenção de água, a sua relação ar-água e a quantidade e capacidade de retenção de nutrientes, além disso, deve apresentar um bom suporte para a vegetação contra a erosão provocada pelo vento e água (CORREA, 2001).

Os principais critérios para a sua escolha são: tamanho, proporção de material orgânico, resistência de geadas, estabilidade estrutural, resistência à erosão pelo vento, drenagem, capacidade de retenção de água, teor de nutrientes, arejamento e valor de pH. Uma mistura adequada deve ser escolhida com referência à localização, clima e espécies que serão plantadas (HUERTA, 2009; IGRA a, 2016).

Em um estudo com caracterização de substratos para uso em telhados verdes, Willes (2014) selecionou e avaliou o desempenho de dez tipos de substratos, disponíveis no mercado, mais abundantes na região e com melhor custo-benefício ambiental, identificando as melhores técnicas de aplicação, de acordo com a necessidade de cada ambiente. Na avaliação do conjunto de características, a turfa marrom apresentou o menor valor de densidade seca, maior porosidade total, maiores valores de água facilmente disponível, água disponível e capacidade de retenção de água, assim como, mesmo valor de espaço de aeração daquele sugerido como referência, sendo um bom material para o uso em telhados verdes, formando compostos com outros materiais e buscando as melhores características e sustentabilidade do sistema.

Segundo Johnston e Newton (2004), para melhorar a retenção de água e a estrutura do substrato, outros materiais podem ser acrescentados, a exemplo: materiais orgânicos (turfa ou algum substituto como fibra de coco e folhas compostadas) ou materiais inorgânicos como perlita ou vermiculita. O substrato ideal será composto de 30-40% de partículas sólidas, 60-70% do volume de poros, sendo 35-45% para incorporar água e 15-25% para aeração. O pH deve ser ligeiramente ácido, com um valor de cerca de 6,0. Os substratos que são muito ricos

em matéria orgânica podem ser misturados com uma proporção de areia, já os substratos pesados podem ser atenuados por meio da adição de uma proporção de grânulos de argila leve. Ao se utilizar solo para composição do substrato, as camadas superficiais devem ser evitadas para misturas, pois tendem a ser infestadas com sementes de ervas daninhas, por isso deve ser utilizada terra de camadas mais profundas.

Alto teor de matéria orgânica no substrato pode levar à contaminação considerável de nutrientes na água de escoamento, nesse ponto, vale lembrar que a vegetação que morre a cada ano forma húmus e aumenta o nível de nutrientes, mas este processo é muito lento. A poeira e a chuva absorvida pela vegetação do telhado irão conter vários minerais, o que também aumenta lentamente os níveis de nutrientes do substrato. Os possíveis efeitos negativos da adubação em telhados verdes devem ser levados a sério, a fim de não danificar a imagem positiva dos telhados verdes devido à contaminação da água de escoamento (EMILSSON et al, 2007).

A carga adicional sobre o telhado é outro fator importante que deve ser considerado na composição do substrato. Johnston e Newton (2004) exemplificam algumas cargas associadas com telhados verdes (para cada centímetro de profundidade do substrato saturado, em kg/m²): de 16-20 para solo; de 20-22 para areia; de 16-18 para cascalho; de 7-9 para solos normais; 3 para argila expandida (com diâmetro de 8-16 mm) e 5 para turfas.

O substrato é também um importante fator em sistemas de coberturas verdes em função de suas propriedades térmicas e de seu consequente comportamento como trocador de energia térmica com a atmosfera, sendo um componente bastante estudado em áreas da ciência como a micrometeorologia agrícola (CHANG, 1971).

3.4.4 Vegetação

Na América do Norte e Europa, plantas do gênero *Sedum sp* e outras plantas suculentas são as escolhas preferenciais para coberturas verdes extensivas. Possuem visual agradável, de rápido crescimento e em pouco tempo formam uma cobertura verde uniforme. No México, até o sul de Guadalajara e Cidade do México, sedums e outras suculentas ainda têm um bom desempenho em coberturas verdes, mas mais ao sul do continente, onde a diferença entre as estações é marcada por períodos secos e períodos chuvosos, as espécies nativas da região devem ser recomendadas. É certo que as pesquisas sobre coberturas verdes têm um longo histórico nas regiões temperadas, no entanto, existe uma carência em informação sobre os tipos de plantas para coberturas verdes que melhor se adaptem ao clima das regiões tropicais (OLIVEIRA, 2012).

Johnston e Newton (2004) sugerem que estas plantas sejam preferencialmente nativas, adaptadas ao clima local, de crescimento rasteiro, tenham maior área foliar, raízes curtas, que

demandassem menor manutenção em termos de rega e poda e que apresentassem elevada capacidade de resistência a estresses climáticos.

As espécies do gênero *Arachis* estão entre as plantas recomendadas para uso em coberturas verdes, de acordo com o trabalho conduzido por Yok e Sia (2008). Os autores indicam 76 espécies de plantas com potencial para uso em telhados verdes, em regiões tropicais, em que grande parte das plantas recomendadas foi selecionada através de experimentos controlados.

O gênero *Arachis* é nativo do Brasil, sendo considerada a serra do Amambaí, entre o Mato Grosso do Sul e o Paraguai, o seu local de origem (GREGORY et al., 1980; FERGUSON et al., 2005). Apresenta uma ampla faixa de adaptação, desde o nível do mar até cerca de 1.800 m, sendo encontrada desde o planalto central brasileiro até a região Sudeste e litoral da Bahia. Desenvolve-se bem em áreas sujeitas ao alagamento, é tolerante à sombra, ao frio e à seca. Embora se desenvolva melhor em climas com boa distribuição de chuvas, esta espécie pode sobreviver a períodos de seca superiores à quatro meses e a geadas em regiões subtropicais. Na estiagem, as plantas perdem as folhas e alguns estolões podem morrer, entretanto, podem se recuperar com o início das chuvas. Adapta-se a solos pobres em nutrientes, deficientes em fósforo, potássio, cálcio e magnésio, ácidos (pH 5,0) e à alta toxicidade de alumínio (VALENTIM et al., 2001; VALLS; SIMPSON, 1994).

Comumente denominada de amendoim forrageiro, a *Arachis pintoii* apresenta boa adaptação em áreas de alta precipitação, com solos de moderada fertilidade e com restrições à seca e encharcamento demasiado, encontra-se difundida nas zonas tropicais e subtropicais do Brasil e do mundo. Por ser ainda uma leguminosa perene, age como fixadora de nitrogênio e controla plantas invasoras (BAPTISTA, 2007).

A planta floresce várias vezes ao ano, geralmente entre a 4ª e 5ª semana após a emergência das plântulas (Figura 08). Em condições de sombreamento, as plantas apresentam crescimento mais vertical, com maior alongamento do caule, maior tamanho e menor densidade de folhas (BAPTISTA et al., 2007). Seu crescimento é rasteiro, atingindo de 20 a 40 cm de altura e a raiz é pivotante, crescendo em média até 30 cm de profundidade. Suas folhas são alternadas, com pelos sedosos nas margens, e seu caule é ramificado e cilíndrico. A floração é indeterminada e contínua e o fruto se desenvolve dentro do solo. O plantio do amendoim forrageiro deve ser feito no início do período chuvoso, quando as condições de umidade são favoráveis e não há riscos de ocorrência de veranicos (GOUVEA, 2008).



Figura 8: *Arachis pintoi* em floração. Fonte: Arquivo do autor.

Em um projeto para a implantação de uma cobertura verde extensiva na Costa Rica, O'Connor (2010) não encontrou espécies suculentas que atendessem satisfatoriamente as condições climáticas impostas pelo ambiente. Porém, observou na região e em outros países da América do Sul, como Porto Rico, Nicarágua, República Dominicana e Brasil, a presença constante da *Arachis pintoi*, a qual chamou a atenção por tolerar condições extremas de plantio (solos arenosos, encostas verticais, severa insolação ou sombreamento). As coberturas verdes foram instaladas sobre terraços individuais com inclinações de 2% a 12%, com áreas de 232m² a 465 m². O plantio Da *Arachis pintoi* foi realizado na época chuvosa e as plantas se desenvolveram bem em apenas um mês, mas, após três meses, na estação seca, a planta apresentou deficiência como se tivesse sucumbido. No entanto, uma observação mais próxima verificou que na base das plantas secas havia pequenos brotos verdes à espera para ressurgir, e ainda, que as raízes estavam firmes. Com o reestabelecimento do fornecimento de água por sistema de irrigação, as plantas voltaram a se desenvolver plenamente em apenas duas semanas. Os resultados desse experimento podem indicar a *Arachis pintoi* como uma planta adequada para coberturas verdes em regiões semitropicais e tropicais, livres de congelamento, em que espécies de sedums não podem ser uma opção de plantio efetivo.

3.5 Benefícios

3.5.1 Eficiência energética

Grande parte dos estudos, já efetuados na área das coberturas verdes, está relacionada com a sua capacidade de isolamento térmico e a consequente melhoria na eficiência energética dos edifícios. Em uma cobertura verde com 0,10m de substrato, estudos demonstram que esse sistema construtivo confere uma economia de 25% a 30% de energia (LIU; BASKARAN, 2003). Segundo Del Barrio (1998), uma cobertura verde não tem a

capacidade de arrefecer um edifício, mas sim, atuar como um bom isolante no verão, reduzindo o fluxo de calor através da cobertura, comparativamente a uma cobertura tradicional.

Segundo Peck et al. (1999), com a utilização de uma cobertura verde, é possível alcançar temperaturas na ordem dos 25 ou 30°C, ao nível da estrutura do telhado e, no interior do edifício, 3 ou 4°C abaixo destes valores. Este fato pode revelar-se importante nos consumos energéticos de edifícios de regiões com climas nos quais o ar condicionado é indispensável para a manutenção de condições interiores. Dessa forma, por cada 0,5°C que se reduza na temperatura interior de um edifício, é possível diminuir em 8% o consumo energético para o arrefecimento do espaço.

3.5.2 Controle da temperatura

O ser humano é um ser homeotérmico, isto é, possui a capacidade de manter a temperatura corporal dentro de certo intervalo pré-determinado, apesar das variações térmicas do meio ambiente (homeostasia térmica). A temperatura de equilíbrio da região corporal central varia entre 36°C a 37°C e é menor pela manhã, aumenta ao longo do dia e adquire máximos valores pelo início da noite. O equilíbrio térmico acontece através do balanço entre a perda e a produção ou aquisição de calor. A temperatura da pele, contrariamente ao que acontece nas regiões corporais internas (região corporal central), tem maior variação de amplitude térmica. O tecido celular adiposo tem função isolante natural (baixa condução de calor) e separa a pele (região mais sensível às variações térmicas externas) da região corporal central (temperatura mais estável). O fluxo sanguíneo cutâneo é que estabelece a ligação entre a pele e a região corporal central (MAGALHÃES et al., 2002).

Segundo Rivero (1985), quando o meio externo não apresenta condições térmicas adequadas, o organismo humano utiliza os mecanismos termorreguladores de forma perceptível. A termorregulação, apesar de ser o meio natural de controle das perdas de calor pelo organismo, representa um esforço extra e, conseqüentemente, uma queda na potencialidade de trabalho (FROTA; SCHIFFER, 1988), sendo necessárias soluções para a adequação térmica do ambiente construído.

De acordo com Theodosiou (2003), as coberturas verdes contribuem para a regulação térmica nos ambientes internos das edificações, mesmo em dias com extremas temperaturas externas do ar, tanto para o frio quanto para o calor. A atenuação térmica propiciada por uma cobertura verde é baseada nas diferentes camadas que reduzem a passagem da radiação solar. Esse efeito isolante não é constante, depende das variáveis que influenciam na proteção térmica, como os fatores de transferência de calor, o índice de água nas camadas do sistema construtivo e a velocidade dos ventos (PORSCHÉ; KÖHLER, 2003).

3.5.3 Prolongamento da vida útil da cobertura

Uma cobertura verde pode contribuir para o aumento do tempo de vida das membranas de impermeabilização da cobertura. Vários autores referem que isto se deve à sua capacidade para atenuar as variações e os picos de temperatura, reduzir a incidência de raios UV, provenientes da radiação solar, e limitar o contato com a umidade exterior (CORREA, 2001).

As coberturas tradicionais possuem um custo menor para sua instalação, comparadas ao sistema de coberturas verdes, mas depois de 15 anos necessitam de reposição (VUJOVIC; OGUREK 2005). Um estudo de PECK et al. (1999) mostra uma cobertura verde que cobria uma membrana de impermeabilização que, 50 anos após a sua instalação, ainda se encontrava em perfeitas condições em uma cidade cujo clima só permite uma duração média de coberturas planas entre 15 a 20 anos.

3.5.4 Retenção das águas pluviais

O aumento das áreas impermeáveis nas cidades resulta numa sobrecarga dos sistemas de recolha de águas pluviais e no conseqüente prejuízo nas linhas de água adjacentes, em conseqüência do arrastamento de poluentes. Uma das formas de amenizar este problema é criando superfícies permeáveis que permitam atrasar o escoamento das águas da chuva. Neste aspeto, as coberturas verdes podem representar uma das soluções, provocando um atraso no escoamento da água e a sua libertação gradual graças à absorção pelas camadas da cobertura e pelo seu uso por parte da vegetação (SANTOS, 2012).

Em Toronto, um estudo de Peck et al. (1999) permitiu concluir que uma cobertura com uma espessura de vegetação, de cerca de 7 cm, não produziu qualquer escoamento durante 3 meses de medições, com uma queda de chuva de 4 mm, contra um escoamento de 48% para uma cobertura de solo e 68% para uma cobertura com cascalho.

Em um trabalho conduzido em São Carlos-SP, Cunha (2004) verificou que no sistema de coberturas verdes, parte da água precipitada é incorporada ao substrato, parte é evapotranspirada e o excesso escoar para o sistema de drenagem municipal. Na cobertura tradicional, uma maior quantidade de água escoar diretamente para as galerias pluviais, ocasionando, assim, um grande fluxo no sistema e, conseqüentemente, inundações no ambiente urbano. Nesse sentido, pode-se dizer que as coberturas verdes ajudam a retardar o fluxo das águas pluviais e reduzem a frequência dos eventos de inundação, o qual é um problema de extrema relevância nas cidades.

3.5.5 Proteção contra incêndios

De acordo com Santos (2012), com o uso das técnicas construtivas adequadas, e como referem à maioria dos construtores, as coberturas verdes podem constituir uma barreira na

propagação de incêndios entre edifícios e do edifício para o telhado, especialmente, quando estas apresentam valores elevados de umidade no substrato. As coberturas verdes podem ajudar a não propagação do fogo nas edificações, entretanto, as plantas secas podem apresentar perigo de fogo. Diante disso, uma alternativa para minimizar a possibilidade dos incêndios seria colocar materiais que não entram em combustão ao longo do perímetro da cobertura, como pedras e cascalhos. Outra opção seria o uso de plantas que retardem a atuação do fogo, como as suculentas, as quais têm alto índice de água em seu interior (PECK; KUHN, 2006 apud LOPES, 2007).

3.5.6 Proteção acústica

Alguns estudos indicam que as coberturas verdes podem funcionar como bom isolante do som exterior. A vegetação e a camada de ar, entre esta e o substrato e o próprio substrato, podem bloquear determinadas frequências. Segundo (PECK e KUHN, 2003 apud SANTOS, 2012), o substrato tende a bloquear frequências mais baixas, enquanto a vegetação permite bloquear as frequências mais elevadas.

Para uma cobertura com 12 cm de espessura a redução de som é na ordem dos 40 dB, podendo atingir reduções até 50 dB em coberturas com 20 cm de espessura (MINKE, 1982 apud PECK et al, 1999).

3.5.7 Aumento do espaço útil

Espaços antes não acessíveis nas coberturas convencionais de casas e edifícios tornam-se uma opção de uso da área com as coberturas verdes. Mesmo quando os telhados verdes são acessíveis apenas como aspecto visual, os benefícios podem incluir descanso e restauração do bem-estar aos seus frequentadores (HARTIG et al. 1991).

O ambiente urbano nos dias de hoje apresenta um constante crescimento e desenvolvimento tecnológico, local em que, cada vez mais, têm-se pessoas vivendo em cidades com superfícies impermeáveis. A escassez de espaços permeáveis exige uma resposta alternativa e viável, como o uso das coberturas verdes em edificações, ajudando a compensar as áreas verdes que estão cada dia mais se extinguindo nos grandes centros urbanos (OBERLANDER; WHITELAW; MATSUZAKI, 2002). Outros usos positivos para os telhados verdes incluem a agricultura urbana, uma vez que a produção de alimentos pode trazer benefícios econômicos e educacionais para os moradores urbanos (PIMENTEL DA SILVA et al. 2008). No Reino Unido, estima-se que, se eficientemente planejados, até 25% das necessidades alimentares urbanas poderiam realmente ser produzidas localmente (VILJOEN, 2005).

Nos climas mais quentes, como em Havana, 50% dos alimentos são produzidos dentro do perímetro da cidade. Entre os benefícios da introdução da agricultura urbana, as vantagens de tais políticas são muitas: o alimento localmente crescido viaja uma curta distância da fonte ao descarte, sendo, portanto, mais fresco e mais nutritivo; as pessoas que vivem nas cidades podem cultivar os alimentos de sua escolha em hortas comunitárias; crianças urbanas têm a oportunidade de aprender em primeira mão sobre hortaliças e frutas, em especial se as escolas adotarem a ideia de hortas “suspensas” em suas edificações. Resíduos de cozinha, em vez de acabarem no aterro, como acontece atualmente, podem ser compostados localmente. E o mais importante, a saúde física e mental das populações urbanas, melhorarias, como ficou evidente nos últimos anos em Cuba (COMMUNITY SOLUTIONS, 2006).

3.5.8 Redução das ilhas de calor

O uso extensivo de materiais como asfalto e concreto nas áreas urbanas resulta na redução da evapotranspiração e na grande capacidade de retenção de calor. Estas condições, gerando o fenômeno chamado de ilhas de calor urbanas (OKE, 1987), nas quais áreas urbanas tornam-se significativamente mais quentes do que as áreas suburbanas e áreas rurais. Esse efeito pode ser reduzido aumentando o albedo (a reflexão da radiação incidente em uma superfície) ou aumentando a cobertura de vegetação, com umidade de solo suficiente para se evapotranspirar.

Pavimentação, telhados e outras superfícies escuras absorvem a radiação solar e reirradiam parte desse calor. O predomínio dessas superfícies no ambiente urbano contribui com o aumento da temperatura do ar no verão de 6°C a 10°C. As altas temperaturas aliadas às partículas suspensas no ar têm como resultado uma densa camada de poluição, prejudicando tanto o ambiente como a saúde humana. No entanto, o uso de coberturas com vegetação ajuda a amenizar a temperatura do ar através de uma menor absorção da radiação solar e, também, pela regulação da umidade, resultado da evapotranspiração das plantas (HENDERSON, 2003).

As coberturas verdes diminuem consideravelmente o aquecimento em suas superfícies. Assim, partículas em suspensão, antes impulsionadas à atmosfera formando capas de gases poluentes, são reduzidas em grandes proporções (MINKE, 2003).

3.5.9 Contribuição à biodiversidade

Com o avanço na urbanização, aumentam a quantidade de estruturas artificiais incompatíveis com a preservação das espécies que outrora ocorriam espontaneamente. As coberturas verdes, embora não sendo um substituto perfeito da natureza, podem tornar-se um local de relevante riqueza biológica (SANTOS, 2012).

Segundo Brenneisen (2006), as coberturas verdes podem fornecer habitat adequado para espécies animais e vegetais, as quais são capazes de se adaptar e desenvolver estratégias de sobrevivência para as condições locais extremas e aptas para alcançar esses habitats nas coberturas. As coberturas verdes precisam ser vistas menos da perspectiva de ornamental jardinagem e conservação de energia e muito mais a partir de uma perspectiva regional da paisagem e planejamento ecológico, como uma ferramenta potencial para a preservação e restauração da biodiversidade em áreas urbanas. As abordagens funcional e técnica, tomadas pela maioria dos desenvolvedores das coberturas verdes, podem ser reforçadas com a abordagem espacial tomada pelas pesquisas da área da ciência da conservação.

3.5.10 Benefícios estéticos e sociais

Uma cobertura com plantas possui um efeito notável se comparado a um telhado convencional. A beleza natural da vegetação traz bem-estar ao “espírito” humano, trata-se de uma percepção subjetiva, que permite sua contemplação, além de trocas de plantas e de experiências entre os moradores (MINKE, 2003). Mesmo que o acesso a alguns tipos de coberturas verdes seja habitualmente limitado, pode proporcionar privacidade e segurança, melhorando a sensação de conforto dos utilizadores (SANTOS, 2012).

Em uma pesquisa realizada pelo Laboratório de Paisagem e Saúde Humana, da Universidade de Illinois (EUA), sobre a relação do bem-estar social e psicológico que as áreas verdes propiciam, concluiu-se que indivíduos que possuem espaços verdes próximos a suas residências têm um espírito comunitário mais acentuado, suportam melhor o estresse e as dificuldades do cotidiano. Quanto mais verde o lugar, menor o índice de crimes contra a pessoa e a propriedade, e, também, menos lixo e pichações. Há, ainda, indícios que as áreas verdes têm efeito restaurador sobre a atenção voluntária dos indivíduos, que está relacionada ao tipo de concentração intensa, necessária para trabalhar ou estudar. Ela determina a qualidade do raciocínio e o modo de lidar com situações difíceis. O contato com a natureza permite contemplação e trocas subjetivas com os estímulos sensitivos do meio (ACKERMAN, 2006).

3.6 Manutenção

De acordo com Santos (2012), para qualquer tipo de cobertura verde, por menor que sejam as suas necessidades de manutenção, há cuidados a serem tomados após a sua instalação. Devido a maioria das camadas do sistema se encontrarem sob a camada de vegetação e serem de difícil acesso, a integridade do sistema é assegurada através da inspeção e limpeza do sistema de escoamento e drenagem, verificação da impermeabilização do

edifício e sua reparação, caso seja necessário. Os cuidados devem incluir regas, podas da vegetação no período apropriado a cada espécie, replantio em áreas com vegetação morta, remoção de plantas infestantes e eventual adubação.

Nas coberturas intensivas, a manutenção vai depender do tipo de substrato e vegetação utilizados, contudo, é aconselhada uma inspeção com a periodicidade de seis meses para a verificação do entupimento dos sistemas de drenagem por detritos e o estado do sistema de impermeabilização. É também importante, verificar o estado de crescimento das raízes, uma vez que estas podem afetar estes dois sistemas. É aconselhado que, como no caso das coberturas intensivas, seja feito um acompanhamento por parte do instalador a partir do momento em que a vegetação se estabelece na cobertura (SANTOS, 2012).

3.7 Desempenho térmico

Os estudos relacionados ao desempenho térmico de coberturas verdes possuem o objetivo de obter benefícios energéticos e melhora no conforto térmico do ambiente construído. O desempenho térmico pressupõe a utilização de padrões de referência comparativa às situações definidas ou anteriormente analisadas, pois ele existe em função das demais situações similares e, portanto, exige sempre um referencial de comparação (VECCHIA, 2003).

Segundo Givoni (1976), a temperatura do ar externo e a radiação solar seguem padrões cíclicos diurnos e anuais, cujos limites de variação dependem da localização geográfica. As condições térmicas internas às edificações, sem controle mecânico, seguem esses padrões com algumas modificações devido a detalhes de projeto e de construção.

O fato dos sistemas de cobertura verde serem diferentes dos convencionais, devida à presença de substrato, vegetação e água, torna necessária a compreensão dos processos de armazenamento e troca de calor, que podem ocorrer sob várias formas.

3.7.1 Transferência de calor

Os processos de transferência de calor no solo podem ocorrer por condução e convecção, com ou sem transferência de calor latente. A temperatura do solo é consequência desses processos e das trocas de calor entre a superfície do solo com a atmosfera (PREVEDELLO, 1996).

Genericamente, a propagação de calor por condução ocorre sem transporte da substância formadora do sistema, ou seja, através de choques entre suas partículas integrantes ou intercâmbios energéticos dos átomos, moléculas e elétrons. A condução térmica pode ser interpretada como a transmissão passo a passo de agitação térmica: um átomo (ou uma molécula) transfere parte de sua energia cinética ao átomo vizinho, sendo assim, um

fenômeno de transporte de energia interna provocado pela heterogeneidade da agitação molecular, um fenômeno termodinamicamente irreversível. Quando observado o fluxo de calor, ele sempre ocorre a partir de uma região de maior temperatura para uma região de baixa temperatura e atua no sentido de equalizar as diferenças de temperatura (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

A condução consiste na transferência de calor de uma zona onde a temperatura é mais elevada para uma zona que apresenta uma temperatura mais baixa. A lei empírica da condução de calor é denominada por *Lei de Fourier* e estabelece que a taxa de calor por condução é proporcional à área normal à direção do fluxo e ao gradiente de temperatura na mesma direção, de acordo com a Equação 1.

$$Q_x = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad \text{Equação 01}$$

Sendo Q_x a quantidade de calor transmitida num tempo t através de uma espessura L em uma direção normal à superfície de área A , devido à diferença de temperatura ΔT . A condutividade térmica k é uma propriedade do material que é primariamente dependente da fase do meio, temperatura, densidade e ligação molecular (HALLIDAY et al, 1996).

Este tipo de transferência de calor acontece de uma partícula sólida à outra, onde a taxa de transferência de calor depende da condutividade térmica do próprio material. Como verificado pela *Lei de Fourier*, quanto maior a condutividade térmica, maior a taxa de transferência de calor através do material. Uma cobertura verde pode, assim, diminuir a transferência de calor por condução, pela presença de materiais com baixa condutividade térmica, como o solo e a água (WARK, 2011).

A convecção é outro dos processos de transferência de calor que acontece entre um fluido e um sólido a diferentes temperaturas quando o escoamento do fluido se faz em contato com a superfície do sólido. Assim, por definição, o fluxo de calor entre uma superfície quente e um fluido frio, que se movimenta sobre essa mesma superfície, é dado pela Equação 2.

$$q = h(T_w - T_f) \quad \text{Equação 02}$$

Sendo o coeficiente de transferência de calor em $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, q o fluxo de calor do fluido, e T_w e T_f as temperaturas da superfície e do fluido respectivamente (INCROPERA; WITT, 1990). No caso das coberturas verdes esse processo ocorre pela água e pelo ar presentes no substrato e também através do efeito do vento em contato com a cobertura.

Além dos processos de condução e convecção, ocorre, ainda, o processo de troca de calor por radiação, processo pelo qual o calor é transferido de um corpo em alta temperatura para um corpo em baixa temperatura, quando os mesmos estão separados no espaço, ainda que exista vácuo entre eles. Geralmente este conceito é aplicado a todos os tipos de processos que transmitem energia por meio de ondas eletromagnéticas (KREITH, 1973). A radiação é emitida quando se forma no interior do corpo e absorvida quando diminui em contato com um corpo. A energia radiante E_b , que um corpo emite, pode ser calculada através da aplicação de um fator de emissão (ϵ) à *Lei de Stefan-Boltzman*, dada pela Equação 3.

$$E_b = \epsilon \sigma T^4 \quad \text{Equação 03}$$

Onde T representa a temperatura absoluta em Kelvin, σ a constante de Stefan-Boltzman ($= 5,6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) e ϵ a emissividade, cujos valores estão compreendidos entre 0 e 1 (INCROPERA; WITT, 1990).

Segundo Serra (2002) e Costa (1982), a radiação solar é o fator que mais influencia nos processos de trocas térmicas, devido a sua forte incidência direta nas superfícies dos fechamentos e, também, devido às radiações provenientes do entorno.

Outros dois processos que influenciam as trocas de calor numa cobertura verde são a evaporação e a evapotranspiração. A evaporação diz respeito à mudança de fase da água presente na cobertura, de líquido para gasoso, necessitando para isso de energia, que é retirada sob a forma de calor. O caso da evapotranspiração é exclusivo da vegetação, que alia o processo de evaporação da água na superfície da vegetação e substrato com o processo de transpiração, no qual a água captada pelas raízes das plantas é utilizada em suas funções metabólicas e sai do vegetal para a atmosfera através dos estômatos, órgãos presentes nas folhas das plantas, responsáveis pelas suas trocas gasosas (SANTOS, 2012).

A diferença entre as coberturas vegetadas e as sem vegetação é qualitativa e quantitativa. O processo de transferência de calor é totalmente diferente. A radiação solar, a temperatura externa e a umidade relativa apresentam valores mais baixos assim que passam a camada da vegetação sobre a cobertura. As plantas, para as suas funções biológicas como a fotossíntese, transpiração e evaporação, absorvem uma quantidade significativa de radiação solar. A radiação solar restante, alterada em termos de carga térmica, influencia o clima interno à medida que passa através da vegetação e dos elementos do telhado (NIACHOU et al., 2001).

Em relação ao substrato sob a vegetação, a sua condutividade térmica depende da sua estrutura, da sua quantidade de água e de ar. Um substrato pouco compacto tem uma maior

proporção de ar, que apresenta uma baixa condutividade térmica e por isso transmite menos calor às camadas inferiores, já um substrato compacto com menor conteúdo de ar conduz mais facilmente o calor às camadas inferiores. Durante o dia absorve o calor da radiação solar e, à noite, o fluxo de calor inverte, perdendo-o para o ambiente. Dessa forma, pode-se dizer que a cobertura da vegetação protege o substrato da radiação direta, durante o dia, e também atrasa a perda da radiação térmica, durante a noite. Em climas em que há queda de neve, a camada formada também ajuda na proteção térmica do substrato. O balanço energético de uma cobertura verde pode então ser representado simplificada pela absorção da radiação solar incidente, o calor armazenado, o calor perdido pela convecção, a energia utilizada no metabolismo e a perda de calor latente por evaporação (CORREA, 2001).

Segundo a maioria dos autores, a melhor performance térmica das coberturas verdes é atingida no verão, quando há maior intensidade e períodos mais longos de incidência de radiação solar. Neste caso, a vegetação contribui com os processos de troca de calor já abordados. Segundo Eumorfopoulou e Aravantinos (1998), do total da radiação incidente, 27% é refletida, 60% é absorvida pelas plantas e substrato e 13% é transmitida ao substrato. O ar retido entre as folhas da vegetação forma uma camada contínua que age como isolante térmico.

O albedo é um índice da capacidade que o material tem de refletir parte da radiação solar incidente, variando de 0 a 1. Quanto maior o albedo, maior a porcentagem da radiação incidente que é refletida e, portanto, uma menor parcela de energia é convertida em calor, resultando em temperaturas superficiais menores. Ainda, a maior ou menor retenção desse calor no interior do material dependerá da emissividade da superfície (GIORDANO; KRÜGER, 2013). Na ausência da cobertura vegetal, parte da radiação, que seria refletida e absorvida pela planta, atinge o substrato, o qual, devido ao menor albedo, absorve essa radiação que é transformada em calor e transmitida para as camadas inferiores.

3.7.2 Comportamento térmico

Como qualquer cobertura ou fachada de um edifício, uma cobertura verde deve fornecer isolamento térmico. É o isolamento que influencia diretamente as trocas de calor com o exterior, que por sua vez dependem diretamente das características físicas dos materiais que compõem a cobertura (SANTOS, 2012).

Segundo Vecchia (2003), para avaliar o comportamento térmico das envolturas de uma edificação é necessário analisar os dados meteorológicos obtidos em superfície (temperatura e umidade relativa do ar, direção e velocidade dos ventos predominantes, pluviosidade e radiação solar global) em função do tempo de exposição às condições climáticas. Nesse sentido, pode-se salientar que a incidência da radiação solar é o elemento

principal nos processos de trocas térmicas, sobretudo, nos sistemas de cobertura das edificações.

A característica mais importante, para o controle térmico dos materiais e componentes construtivos, é avaliar o seu comportamento térmico do ponto de vista da transmissão de calor. Com a utilização de materiais com inércia térmica ou capacidade isolante, pode-se obter o equilíbrio térmico das temperaturas no interior das edificações. O principal critério para conseguir esse equilíbrio térmico é ter um fluxo mínimo no ganho de calor interno pelas envolventes, no verão, e uma perda mínima de calor, também, pelas envolventes, no inverno (OLGYAY, 1998).

Considerando a temperatura do ar externo e a temperatura superficial interna de um fechamento qualquer, a amplitude térmica média (Δ) é a diferença entre as temperaturas médias máxima e mínima; o atraso térmico (ϕ) é o tempo, em horas, transcorrido entre a variação térmica no exterior e sua manifestação na superfície interna do fechamento; e o amortecimento térmico (μ) é a capacidade do fechamento de diminuir a amplitude das variações térmicas, obtido por meio da razão entre amplitude superior interna (Δ_{si}) e amplitude superior externa (Δ_{se}) (ABNT, 2003).

O comportamento térmico, dessarte, analisa a resposta do material ou de um sistema construtivo à solicitação térmica. É uma análise feita de forma a classificar o objeto de investigação em relação à sua condutividade e capacidade térmicas (SANTOS et al., 2004). Na presente pesquisa, foi adotado o conceito de comportamento térmico para análise e comparação dos dados de temperatura superficiais dos sistemas de cobertura estudados, frente aos dados meteorológicos.

3.7.2.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma característica específica dos materiais de conduzir energia térmica. Estruturas feitas com materiais de alta condutividade térmica conduzem energia térmica de forma mais rápida e eficiente às estruturas análogas feitas de materiais com baixa condutividade térmica. Dessa maneira, materiais com alta condutividade térmica são utilizados em dissipadores térmicos e materiais de baixa condutividade térmica são utilizados em objetos que visam prover isolamentos térmicos. A condutividade térmica depende fortemente tanto da pureza do material, quanto da própria temperatura na qual este se encontra (especialmente em baixas temperaturas). Em geral, a condução de energia térmica, nos materiais, aumenta à medida que a temperatura aumenta. A condutividade térmica é expressa no coeficiente de condutividade térmica, medido em $W m^{-2} K^{-1}$ (CALLISTER, 2003).

No caso das coberturas verdes, o valor do coeficiente de condutividade térmica é de difícil obtenção, devido ao seu caráter heterogêneo, principalmente, pela presença de

vegetação com características por vezes muito distintas na mesma cobertura (SANTOS, 2012).

3.7.2.2 Inércia térmica

A inércia térmica pode ser definida como uma característica de um corpo que lhe permite resistir à mudança de estado e, conseqüentemente, às alterações de temperatura (CORREA, 2001). Aplicado a um edifício, a inércia térmica é a capacidade de amortecer os extremos de temperatura interiores e exteriores, diminuindo as variações de temperatura interior. Este fator está diretamente dependente à massa térmica dos materiais, ou seja, à sua capacidade de acumulação de calor. Quanto maior a massa térmica de um material, maior a sua capacidade de acumulação de calor, o que lhe permite resistir mais facilmente às variações de temperatura.

Pela inércia térmica, o calor externo, ganhado durante o dia, é armazenado na massa dos elementos que compõem a envoltória da edificação e somente parte deste calor é transmitido para o interior dos ambientes. Nesse contexto, é possível avaliar a inércia térmica decompondo-a em dois fenômenos distintos, o atraso térmico e o amortecimento térmico, os quais se relacionam diretamente com as características térmicas do material e sua espessura (PAPST, 1999).

Dado que as temperaturas e a radiação solar seguem padrões diários cíclicos, dependendo da latitude, as condições térmicas de um edifício sem climatização seguem esses mesmos padrões, dependendo, é claro, dos materiais que o constituem. As diferentes constituições de materiais vão modificar, inclusive, as variações da amplitude entre as temperaturas máximas e mínimas (MORAIS, 2004).

Na prática, a partir da análise desse fator, pode-se definir o atraso térmico como sendo a diferença de tempo, em horas, decorrido desde o extremo de temperatura registrado no exterior e a manifestação desse extremo no interior do edifício. Uma cobertura que apresente um grande atraso térmico revela-se um bom elemento acumulador de calor e conseqüentemente uma boa solução de isolamento térmico. O amortecimento térmico é definido como sendo a razão entre a amplitude térmica externa e a amplitude térmica interna, assim como caracteriza um edifício em relação à sua capacidade de diminuição das amplitudes térmicas no seu interior (SANTOS, 2012)

Para Frota e Schiffer (1988), nem sempre a inércia térmica tem suas vantagens, pois em lugares de clima quente e úmido dificulta a retirada do calor interno, prejudicando o resfriamento da construção. Assim, quando a temperatura do ar externo, no período noturno, está agradável, a envolvente começa a transmitir o calor armazenado durante o dia. Portanto, o uso de elementos construtivos com considerável inércia térmica se faz pertinente em regiões

com grandes amplitudes da temperatura do ar externo nas estações quentes (GOODWIN; CATANI, 1979).

3.7.3 Revisão da literatura

As edificações, em geral, estão sujeitas às perdas e aos ganhos térmicos através de seus fechamentos. A envolvente é a responsável em manter estáveis os níveis de temperatura e de umidade do ar, dentro das margens admissíveis pelo corpo humano. Nesse sentido, a cobertura é a parte das edificações térreas que está sujeita às maiores flutuações térmicas, pois durante o dia alcança elevadas temperaturas superficiais internas, por causa de sua exposição direta à radiação solar e, durante a noite, é a parte das envolventes opacas que mais calor perde por radiação, para a abóbada celeste (MACHADO; BRITO; NEILA, 2003 e GIVONI, 1976).

Segundo Minke (2003), uma pesquisa realizada na Alemanha comprovou que para temperaturas do ar externo com valor de 30°C, a temperatura no substrato da cobertura verde não ficou acima dos 25°C. A atenuação térmica proporcionada no verão pelas coberturas verdes é ainda mais evidente do que o efeito da isolação térmica no inverno.

ONMURA et al. (2001) comprovou-o experimentalmente ao registrar uma diferença de 30°C na temperatura da superfície interna de uma laje nua, comparada com uma cobertura verde durante o dia, e, ao estimar através de cálculo simples, esta diferença acompanhou um decréscimo de 50% no fluxo de calor para o interior do edifício.

Medições realizadas em Cingapura por Wong et al. (2003) investigando o impacto térmico causado pelos telhados verdes e telhados sem vegetação, na redução das temperaturas de superfície e redução de ganho de calor, revelaram o efeito positivo dos telhados verdes, que apresentaram diferença máxima de 4,2°C de temperatura em comparação ao telhado sem vegetação.

Del Barrio (1998) concluiu, através do uso de modelação matemática, usando dados climáticos da cidade de Atenas, na Grécia, que, em relação ao controle da temperatura, estas coberturas poderiam funcionar como eficazes dispositivos de isolamento térmico, reduzindo o fluxo de calor através dos telhados. A principal conclusão desse estudo foi que coberturas verdes atuam melhor como dispositivo de isolamento do que refrigerador da cobertura. Dessa maneira, o projetista deve privilegiar plantas com folhagem larga, de modo a garantir uma baixa transmissão de radiação solar; e escolher solo leve, que reduza a condutividade térmica e o peso da cobertura.

Santos (2012) realizou um estudo de comportamento térmico comparativo utilizando uma célula de teste dividida em dois compartimentos, um com cobertura convencional e outro com cobertura verde extensiva. Os dados de temperatura e fluxo de calor obtidos permitiram

concluir que o desempenho da cobertura verde foi semelhante à da cobertura de teste para o período de medições. Foi utilizado, como célula de teste, um contêiner de aço pintado de branco, externamente com forração interna das paredes, formado por painéis de isolamento térmico de espuma de poliuretano, sendo que em uma das fachadas foi utilizado fechamento de vidro temperado. Um compartimento recebeu uma cobertura verde extensiva, formada por uma camada de 10cm de substrato e vegetação formada por plantas do gênero *Sedum sp*, e o outro recebeu cobertura convencional, formada por duas chapas galvanizadas brancas separadas por lâ de vidro. Devido à forte exposição solar da fachada a sul da célula de teste, as temperaturas interiores superaram as exteriores à célula e o fluxo de calor durante o dia foi maioritariamente para o exterior da célula, sugerindo alterações estruturais na célula de teste para diminuir a influência da radiação solar através da fachada.

Theodosiou (2003) demonstrou, através de modelagem, que as coberturas com vegetação podiam atuar como isolantes, ao reduzir o fluxo de calor através da cobertura. As principais características que possibilitavam esse efeito eram: a área total foliar, altura da folhagem, espessura da camada do solo (densidade aparente e conteúdo de umidade), evapotranspiração, tipo de vegetação da cobertura, espessura da camada isolante, umidade relativa e velocidade do vento.

Coutts et al (2013) avaliaram comparativamente as propriedades de isolamento térmico através da análise do balanço de radiação, da taxa de evaporação e do fluxo térmico de três tipos de cobertura, utilizando plataformas de teste durante o verão na Austrália. As comparações foram realizadas entre um telhado de metal, com isolante térmico e pintado com tinta branca refletiva, uma cobertura verde extensiva com 0,15m de substrato e vegetação formada por plantas do gênero *Sedum sp* e uma cobertura com substrato sem vegetação. Para as coberturas estudadas, os resultados sugeriram que os telhados brancos, combinados com isolamento, proporcionam o maior benefício em termos de mitigação de calor urbano e transferência de energia nas edificações. O alto albedo do telhado branco reduziu substancialmente a radiação líquida, deixando menos energia disponível na superfície para o aquecimento sensível durante o dia. Em condições quentes e ensolaradas e sob irrigação reduzida, a evapotranspiração do telhado verde foi baixa, levando um elevado fluxo de calor sensível nessa cobertura durante o dia, assim como verificado também no substrato sem vegetação. A irrigação melhorou o desempenho do telhado verde, aumentando a evapotranspiração. Os resultados sugeriram que o substrato sem cobertura pode fornecer um efeito maior sobre a taxa de evaporação, uma vez que a resistência à perda de água pela de vegetação não está presente. A taxa de evaporação no substrato sem cobertura foi maior do que na cobertura vegetada após a irrigação, quando o solo estava seco a taxa de evaporação foi menor no substrato sem cobertura, que, combinado com o baixo albedo da superfície,

resultou em elevado fluxo de calor, verificado principalmente durante o período mais quente do dia, sugerindo que se esse efeito pode ser minimizado com a aplicação de pedrisco de cor clara sobre as partes expostas. O fato da vegetação possuir um albedo mais elevado do que o substrato exposto pode ter contribuído com a redução da temperatura e da taxa de evapotranspiração.

Segundo Wong (2003), em testes empíricos encontraram-se valores de temperaturas maiores sob as vegetações mais esparsas, enquanto menores valores de temperaturas foram encontrados sob vegetações com folhagens mais densas e menos espaçadas, considerando desejável a utilização de um cultivo com o maior adensamento de plantas possível. De acordo com os resultados obtidos por Del Barrio (1998) para a redução eficiente dos fluxos de calor para o interior de uma edificação, devem-se utilizar plantas com muitas folhas, preferencialmente horizontais e utilizar solo leve e aerado, como turfa, para aumentar o atraso térmico.

Blanusa et al (2013) estudaram quatro espécies de plantas durante o verão na Inglaterra com o objetivo de testar a hipótese de que as plantas diferem no seu potencial de arrefecimento da cobertura. No experimento, foram utilizados contêineres com 0,2 m de substrato e cada contêiner recebeu uma espécie vegetal na cobertura e um deles foi mantido com substrato sem vegetação. As espécies utilizadas foram *Sedum sp*, *Stachis bizantina*, *Bergenia cordifolia* e *Hedera hibérnica*. Foram mensurados a temperatura das plantas, a temperatura do ar abaixo da camada foliar e a umidade do substrato. Os autores investigaram como a morfologia foliar influencia na sua temperatura e o quanto a baixa umidade do substrato afeta esses valores, a relação entre a temperatura foliar e a temperatura do ar acima e abaixo da camada de vegetação (potencial de arrefecimento do ar e da cobertura abaixo da vegetação). Como resultado verificaram que *Stachis* superou as outras espécies em termos de redução da temperatura foliar (5°C a menos do que *Sedum sp*, mesmo com baixa umidade no substrato), menor temperatura abaixo da vegetação (12°C a menos) e, mesmo em períodos mais quentes, apresentou temperatura menor acima da vegetação (até 1°C durante curtos intervalos) quando a umidade do substrato não foi limitada.

Liu e Baskaran (2003) estudaram o comportamento térmico de coberturas verdes no Canadá com ajuda de uma instalação experimental com área de cobertura de 72m², dividida com uma cobertura betuminosa modificada, utilizada como membrana impermeabilizante. Uma parte da cobertura foi deixada exposta e a outra foi instalada uma cobertura verde extensiva com 0,15 m de substrato. As temperaturas registradas na membrana descoberta foram superiores a 70°C, mas raramente ultrapassaram os 38°C na membrana abaixo da cobertura verde. A partir de uma observação de 660 dias, os autores verificaram que as oscilações de temperatura a que uma membrana de uma cobertura de referência estava

exposta, apresentavam uma mediana de 42 a 47°C, enquanto que as oscilações observadas na cobertura verde apresentavam uma mediana de apenas 5 a 7°C. Os autores concluíram que uma cobertura com as características da estudada poderia reduzir a temperatura da membrana de impermeabilização no verão. Além disso, a cobertura verde moderava as flutuações de temperatura, especialmente em meses de verão, contribuindo também com a redução no consumo de energia utilizada na climatização durante este período.

O mesmo efeito de diminuição de temperatura foi comprovado por Vecchia (2005), utilizando uma cobertura de telhado verde em células de teste de alvenaria, com dimensões de 2,3 m x 2,7 m, monitoradas por sensores de temperatura, o qual registrou diferença de 8,0°C em relação à temperatura ambiente que era de 34°C, sendo que a amplitude térmica registrou 9,2°C e no ambiente externo o registro foi de 21,4°C.

Ferraz (2012) realizou uma pesquisa experimental para verificar o potencial de economia de energia na obtenção de condições de conforto térmico no ambiente interno por meio de dois tipos de cobertura: verde e telha cerâmica. A análise do comportamento térmico das coberturas verdes foi realizada por meio de coleta de dados de variáveis ambientais, durante um período de 10 meses, de um protótipo instrumentado, construído em São Paulo-SP. Os dados levantados foram comparados com os dados de um segundo protótipo de mesmas dimensões e igualmente instrumentado, com cobertura cerâmica, sob as mesmas condições ambientais. A comparação dos resultados e análises em dias e episódios representativos de cada estação comprovou a eficiência das coberturas verdes para retardar o ganho térmico da edificação.

Em um estudo para identificar espécies com potencial de uso em coberturas verdes extensivas em Itirapina-SP, Beatrice (2011) conduziu um experimento com plataformas de teste utilizando três espécies vegetais adaptadas ao clima local em três profundidades diferentes de substrato (0,05m, 0,75m e 0,10m), analisando o desenvolvimento da vegetação e a temperatura do substrato, a fim de verificar a influência da vegetação no aquecimento do substrato em relação às distintas profundidades. Os resultados de comportamento térmico indicaram melhor desempenho de solos à profundidade de 0,10m, independentemente do tipo de planta cultivada. O autor concluiu que solos de menor espessura são mais dependentes de cobertura vegetal para minimizar seu aquecimento e que os solos de maior espessura o fazem com menor dependência da vegetação. O melhor desempenho térmico foi observado em solos de 0,10 m, em relação às profundidades menores, embora não variasse seu comportamento térmico significativamente com o cultivo das três diferentes espécies de plantas, referente aos valores de cobertura atingidos neste experimento.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 Delineamento experimental

O experimento foi composto por duas plataformas de teste construídas de forma a simular um sistema de telhado verde extensivo, nas quais foram instalados conjuntos de sensores conectados a um sistema de aquisição de dados. O sistema permitiu registrar a evolução temporal dos parâmetros necessários ao estudo do comportamento térmico, semelhante às metodologias utilizadas no trabalho de Coutts et al (2013). Ambas as plataformas foram preenchidas com substrato composto por uma mistura de turfa com carvão vegetal e de solo do local do experimento, sendo que somente uma recebeu o plantio de vegetação, denominada “Plataforma Verde” e a outra foi mantida sem vegetação, denominada “Plataforma Controle”, a qual simula o comportamento térmico de um solo exposto. Foram monitoradas as temperaturas do nível superior e inferior do substrato e também as temperaturas externas abaixo da base das plataformas.

As análises do comportamento térmico foram realizadas a partir das abordagens espacial e temporal da Climatologia Dinâmica, a qual permite visualizar fenômenos de caráter temporal mais exíguo, como a identificação do ritmo climático expresso pelo regime de chuvas, pelos períodos de elevada secura do ar, ou mesmo pela variação dos valores da pressão barométrica ao longo da penetração de frentes frias, acompanhadas pela alteração da velocidade e da direção predominantes dos ventos (CUNHA; VECCHIA, 2007), possibilitando a identificação de episódios representativos do fato climático e suas repercussões sobre os valores das temperaturas obtidas das plataformas de teste através da elaboração e análise de gráficos.

4.1.1 Caracterização da área de estudo

O trabalho foi conduzido no Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais – CRHEA da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – EESC-USP. O CRHEA está localizado às margens da Represa do Lobo no município de Itirapina-SP, região central do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 22°01’22”/22°10’13” S e 43°57’38”/47°53’57” O, com altitude de 733 m (Figura 09).



Figura 9: Localização espacial do Município de Itirapina e imagem de satélite indicando a localização do CRHEA. Fonte: adaptado de IBGE e Google Earth (2016).

O clima da região é quente com inverno seco do tipo Cwa, de acordo com a classificação clássica de Köppen-Geiger (PEEL, 2007). Sob a ótica dinâmica do clima, a região se caracteriza pela passagem de frentes frias ao longo de todo o ano. Segundo Monteiro (1973), a região de São Carlos possui clima controlado por massas equatoriais e tropicais, caracterizando-se por climas tropicais alternadamente secos e úmidos. No período seco, entre os meses de abril e setembro, a frequência de chuva diminui consideravelmente e se constitui na área de inverno nitidamente mais seco do Estado de São Paulo, quando predominam sobre a região as massas de ar Tropical Continental (mTc), Tropical Atlântica (mTa) e Polar Atlântica (mPa), apresentando baixa precipitação, pouca nebulosidade, baixa umidade relativa e temperaturas médias menores que as dos períodos chuvosos.

A estação chuvosa ocorre nos meses de outubro a março, devido às incursões da massa Equatorial Continental (mEc) e ao dinamismo da Frente Polar Atlântica sobre a Tropical Atlântica, que responde, em grande parte, pela gênese das chuvas que se produzem durante a atuação de sistemas frontais nesse período do ano (MONTEIRO, 1973; BARBOSA, 2009).

Os baixos totais pluviométricos no período seco estão associados à atuação do ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul), pois nesta estação tal sistema alcança sua posição mais a oeste do continente se estendendo até a região sudeste do Brasil. Eventos de chuva ocorrem quando os sistemas frontais e ciclones subtropicais e extratropicais conseguem se sobrepor ao ASAS (REBOITA, 2010). No verão, a persistente precipitação nas regiões Sudeste, sul do Nordeste, norte do Paraná e Brasil central está relacionada à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), um fenômeno típico neste período na América do Sul e se caracteriza por uma faixa de nebulosidade convectiva que, quando se configura, estende-se desde o Sul da Amazônia em direção ao Sudeste até o Oceano Atlântico Subtropical. (QUADRO, 1994).

4.1.2 Construção das plataformas de teste

As plataformas de teste foram construídas junto ao canteiro experimental da Estação Climatológica do CRHEA (Figura 10).



Figura 10: Estação climatológica e canteiro experimental do CRHEA com a indicação do local do experimento. Foto: Eduardo Fraccaroli, 2015.

A estrutura das plataformas consiste em uma caixa com dimensões de 2,20m x 2,20m de base, com laterais de 0,15m de altura. Segundo Rowe (2008) *apud* Beatrice (2011), para este tipo de experimento não é necessário reconhecer obrigatoriamente algum padrão de medida com experimentos semelhantes, devendo atender como prioridade as condições disponíveis ao alcance do pesquisador. De modo a se obter a reprodução mais próxima de uma cobertura verde utilizada em construções, as dimensões adotadas no presente trabalho são semelhantes àquelas utilizadas nas pesquisas sobre desenvolvimento vegetal e comportamento térmico por Blanus et al (2013), Coutts et al (2013) e Monterusso et al (2005), estando entre as maiores utilizadas neste tipo de experimento.

Para a construção das caixas foram utilizadas chapas de aglomerado de resíduos plásticos prensados como base. Nas quatro laterais foram utilizadas chapas de compensado de madeira, sendo uma delas perfurada para permitir o escoamento da água.

A estrutura foi fixada em barras retangulares de aço galvanizado e suspensa por duas traves de madeira a uma altura de 1,00m em relação ao nível do solo. Outras quatro chapas de madeira foram fixadas lateralmente, abaixo da base, formando uma cavidade para funcionar como quebra-vento. Segundo Coutts et al (2013), essa altura das plataformas e a construção da cavidade são necessárias para se evitar a influência da temperatura do solo, dos ventos e também a incidência direta da radiação solar nos sensores (informação pessoal)¹ (Figura 11).

¹ Coutts, A. Mensagem enviada por andrew.coutts@monash.edu em abr/2015.



Figura 11: Construção das plataformas de teste. Fonte: Arquivo do autor.

Foi adotada uma inclinação de 5% para a estrutura, a fim de se obter uma drenagem lenta e otimizar o tempo de retenção da água, de forma a tornar mais uniforme a distribuição da umidade no substrato, como nos modelos de Monterusso et al (2005) e Beatrice (2011).

4.1.3 Impermeabilização

A impermeabilização das plataformas foi executada com a aplicação de uma membrana de polietileno de alta densidade (PEAD) fixada de modo a recobrir todas as faces internas e externas das plataformas (Figura 12).



Figura 12: Aplicação da membrana de PEAD. Fonte: Arquivo do autor.

O polímero do PEAD constitui-se em um material leve, 100% impermeável à água e bastante resistente à degradação pela ação de intempéries, como a radiação ultravioleta e as variações de temperatura. A membrana foi instalada com o uso de ferramentas de corte e fixação, permitindo o pronto uso das plataformas.

4.1.4 Drenagem

Sobre a membrana de impermeabilização foi instalado um sistema de drenagem da água formado por um geocomposto estruturado modelo *MacDrain 1L*[®] com a função de não permitir a saturação muito prolongada do substrato, porém, mantendo a umidade adequada para o desenvolvimento radicular da vegetação.

O geocomposto possui 18mm de espessura e é constituído por um geotêxtil não-tecido aderido a uma geomanta tridimensional flexível formada por filamentos de polipropileno com mais de 90% de vazios aderida a um geotêxtil não-tecido de poliéster, que proporcionam uma capacidade de drenagem de 144 L/h (Figura 13). O geotêxtil retém as

partículas menores do substrato, impedindo que sejam carreadas para os drenos evitando a sua colmatação, enquanto que permite a passagem da água (MACCAFERRI, 2016).



Figura 13: Geocomposto estruturado. Fonte: Arquivo do autor.

4.1.5 Substrato

O substrato utilizado foi elaborado através da mistura de um substrato comercial, composto por turfa e carvão vegetal triturado, com o solo proveniente do próprio local do estudo, conforme as recomendações de composição mencionadas no item 3.4.3.. O solo foi retirado de uma trincheira com aproximadamente 0,50m de profundidade, previamente peneirado para retirada de pedras e em seguida homogeneizado manualmente com o substrato comercial na proporção de 1:1 (v/v) (Figura 14).



Figura 14: Elaboração do substrato para o preenchimento das plataformas. Fonte: Arquivo do autor.

As plataformas foram preenchidas com substrato de modo a se obter uma espessura de 0,10m no momento da instalação dos sensores. Para isso, as plataformas foram preenchidas e niveladas uniformemente até se atingir a espessura inicial de 0,11m de substrato, considerando que o substrato sofre uma compactação naturalmente ao ser agitado (Figura 15). A espessura adotada teve como base aquela indicada para telhados verdes extensivos (DUNNET, 2008; MINKE, 2003) e utilizada em trabalhos semelhantes com plataformas de teste desenvolvidos no Reino Unido, Austrália, Portugal e Estados Unidos (STOVIN et al, 2015; BLANUSA et al, 2013; BERRETA et al, 2014; COUTTS et al, 2013; SANTOS, 2012; MONTERUSSO et al, 2005) e também no Brasil (BEATRICE, 2011; MILLER, 2014).



Figura 15: Preenchimento das plataformas com substrato. Fonte: Arquivo do autor.

O solo local possui origem mineral e é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa média. São desenvolvidos de arenitos com elevada permeabilidade, baixa retenção de água e baixa coesão e podem sofrer maior estresse hídrico nos períodos de estiagem. Possuem característica ácida e baixa retenção de cátions, necessitando fertilização corretiva frequente (OLIVEIRA et al, 1999; IAC, 2016).

Amostras da mistura foram coletadas no momento do plantio e encaminhadas para ensaios de determinação da densidade e do teor de umidade ao Laboratório de Solos do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, assim como para a realização da análise granulométrica e determinação da fertilidade ao Laboratório de Análises de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) (Tabela 01). Os ensaios para a determinação da densidade e do teor de umidade, de acordo com a norma ABNT NBR 6457 (1986), mostrou que o substrato utilizado possui baixa densidade, elevada porosidade e boa capacidade de retenção de umidade, fatores que favorecem o bom desenvolvimento da vegetação (conforme mencionado no item 3.4.3.). A partir da análise granulométrica e de fertilidade puderam ser determinadas as dimensões das partículas do substrato e de suas respectivas porcentagens de

ocorrência, de acordo com a metodologia de análises utilizadas por Camargo et al (2009), possibilitando a sua classificação textural e também as condições químicas do substrato pela quantificação dos nutrientes presentes. Pelos resultados das análises, o substrato foi classificado como argiloarenoso e com fertilidade mediana, possuindo teores de nutrientes médios a altos, acidez elevada e alto teor de matéria orgânica, baseando-se nos valores limites dos nutrientes para o Estado de São Paulo, definidos pelo IAC (2015).

Tabela 1: Composição física e química do substrato

Componente	Unidade	Método
Densidade seca	0,8 kg/dm ³	ABNT NBR 6457/1986
Densidade saturada	1,28 kg/dm ³	ABNT NBR 6457/1986
Teor de umidade da amostra saturada	58,4 %	ABNT NBR 6457/1986
Porosidade	70 %	ABNT NBR 6457/1986
Classificação textural	Argiloarenoso	IAC
pH	4,8	IAC
Fósforo	24 mg/dm ³	IAC
Potássio	4,3 mmolc/dm ³	IAC
Cálcio	23 mmolc/dm ³	IAC
Magnésio	6 mmolc/dm ³	IAC
Matéria orgânica	57 g/dm ³	IAC
SB	33,3 mmolc/dm ³	IAC
CTC	113,3 mmolc/dm ³	IAC
V	29 %	IAC

Laboratório de Geotecnia da EESC-USP e Laboratório de Análise de Solos do IAC (2015).

4.1.6 Seleção da espécie vegetal

Considerando-se os critérios propostos para orientar a escolha mais apropriada ao uso em telhados verdes extensivos em países de clima tropical, mencionados no item 3.4.4, foi selecionada a espécie *Arachis pintoii* para compor a cobertura da plataforma de teste.

A *Arachis pintoii* pertencente à família *Fabaceae*, é uma planta herbácea perene, de porte baixo (altura entre 20 e 60 cm), hábito estolonífero prostrado (crescimento rasteiro) e lança estolões horizontalmente em todas as direções em quantidade significativa, que se fixam ao solo por meio de raízes abundantes que ocorrem nos nós, além de ajudar na fixação do nitrogênio no solo (MIRANDA, 2008).

O plantio foi realizado no dia 08/08/2015 com mudas adquiridas já adultas que foram transplantadas por meio de estolões. Segundo Valentim et al. (2001), diversos estudos mostram que a densidade de plantio é um dos fatores relacionados com o estabelecimento lento característico da *Arachis sp* entre outros fatores, como a forma de preparo da área,

características físicas e químicas do solo e sua disponibilidade hídrica, como também a viabilidade das mudas. Em um trabalho sobre desenvolvimento vegetal utilizando mudas da espécie *Arachis repens*, Beatrice (2011) verificou que a cobertura do solo pela planta, cultivada com 0,10m de substrato e sem irrigação, atingiu o valor máximo de 50% da área cultivada durante a primavera, valor abaixo dos 60% sugerido, pela organização “Sociedade Alemã de Pesquisa da Paisagem, Desenvolvimento e Construção” (FLL, 1995), como mínimo para o melhor aproveitamento de telhados verdes.

Neste trabalho, para se obter um estabelecimento rápido da vegetação e a cobertura total do substrato, quando da instalação dos sensores, foram utilizadas 225 mudas com espaçamento de 0,15 x 0,15m, formando uma densidade de 46 mudas/m². A cobertura total foi atingida após 7 semanas após o plantio, verificada visualmente quando não se podia mais enxergar o substrato (Figuras 16A e 16B).



Figura 16: (A) Plantio das mudas no dia 08/08/2015; (B) a cobertura vegetal após 7 semanas.

4.2 Irrigação

Neste trabalho a irrigação foi caracterizada como um tratamento suplementar aos períodos sem precipitação. Como o trabalho foi conduzido durante um período quente e seco, devido à característica climática da região, em praticamente todos os dias foi necessária a irrigação suplementar. Embora não tenha sido mensurada, procurou-se realizar a irrigação manualmente de maneira mais uniforme e padronizada em duas etapas com uma mangueira conectada a uma motobomba.

Na primeira etapa, durante a fase de estabelecimento das mudas na plataforma verde, o substrato foi mantido saturado nas primeiras duas semanas contadas do dia do plantio, realizando-se a irrigação duas vezes ao dia, no início da manhã e no final da tarde, até que fosse atingida a capacidade de campo e a água começasse a extravasar pelos drenos. Na segunda etapa, após este período, foi mantida uma irrigação de manutenção com duração de 5 minutos, uma vez ao dia de modo a manter o substrato úmido. Na plataforma controle foi realizada somente a irrigação de manutenção para se manter a umidade do substrato.

4.3 Instrumentação e aquisição dos dados

Para se obter as medições de temperatura foram instalados nas plataformas de teste 14 termopares tipo T, as quais consistem em dois filamentos metálicos de cobre-constantan (liga metálica de cobre e níquel com Cu55% Ni45%) revestidos por um material isolante, podendo registrar valores de temperatura na faixa de -270°C a 400°C , com erro aproximado de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Em uma extremidade, os filamentos são mantidos unidos (Figura 17) e a outra extremidade é conectada a um *datalogger*, que registra e armazena os valores de acordo com uma rotina de programação. A diferença de temperatura entre a extremidade e a temperatura de referência do *datalogger* gera uma força eletromotriz proporcional e o valor é registrado. As extremidades dos termopares instalados nas plataformas foram revestidas com uma camada delgada de resina epóxi para proteção contra a oxidação, conforme orientação do fabricante, uma vez que ficariam em contato direto com a umidade do solo, podendo prejudicar as medições.

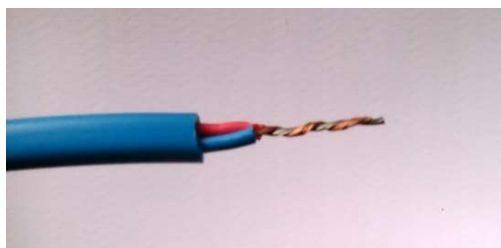


Figura 17: Termopar tipo T. Fonte: Arquivo do autor.

Os termopares foram conectados a um multiplexador AM25T e este conectado a um *datalogger* CR10X (ambos da empresa Campbell Scientific Inc.). O multiplexador é um distribuidor de canais independentes o qual possibilita a conexão de uma maior quantidade de sensores que, por sua vez, são conectados ao *datalogger*. Os termopares foram calibrados colocando-os todos juntos em um recipiente com gelo fundente para verificação da temperatura e do tempo de resposta de cada sensor antes da instalação e, então, identificados e protegidos por conduítes. Uma bateria recarregável de 12V, conectado a um painel fotovoltaico, permite o fornecimento ininterrupto de energia ao sistema, que fica acondicionado em um gabinete selado ao lado das plataformas de teste (Figuras 18A e 18B).



Figura 18: (A) Datalogger e multiplexador com a conexão dos termopares; (B) datalogger junto às plataformas de teste. Fonte: Arquivo do autor.

O *datalogger* foi programado através do programa *Short Cut* (Campbell Scientific Inc) para se obter registros de temperatura máxima a cada 20 segundos com totalização a cada 30 minutos, somando 180 medições por hora e 4320 medições diárias de cada um dos pontos que compuseram a série de dados.

Após a montagem e programação dos equipamentos, os sensores foram instalados nas plataformas de teste. Cada plataforma recebeu um conjunto de 7 sensores, sendo 3 no nível superior do substrato, 3 inferiores, no nível mais profundo do substrato e 1 externo, abaixo da base da plataforma. Mesmo que o substrato tenha sido elaborado de maneira homogênea e distribuído uniformemente nas plataformas, os valores de temperatura podem sofrer variações entre os pontos nas superfícies por não se constituir de um material uniforme e, ainda, sofrer alterações ao longo do período de estudo. Optou-se então por utilizar conjuntos de três sensores para as medições, com o objetivo de garantir maior confiabilidade em relação à obtenção dos valores de temperatura das superfícies superior e inferior do substrato, do que se utilizar somente de um sensor. Esta opção também garante maior segurança na condução do experimento, uma vez que se algum sensor viesse sofrer alguma interferência que afetasse o seu correto funcionamento, haveria outros dois realizando as medições, possibilitando assim o seu ajuste sem comprometer a continuidade da aquisição dos dados, fator importante quando se trabalha com medições de temperatura frente a um episódio climático representativo, o qual poderia ocorrer justamente no período em que o sensor viesse a falhar.

Os sensores superiores da Plataforma Verde foram denominados como Verde Superior (VS), os inferiores denominados como Verde Inferior (VI) e os externos denominados como Verde Externo (V Ext). Na Plataforma Controle, os sensores superiores foram denominados como Controle Superior (CS), os inferiores denominados como Controle Inferior (CI) e os externos denominados como Controle Externo (C Ext). Para o posicionamento dos sensores, a área da plataforma foi dividida em três terços longitudinalmente e transversalmente, encontrando-se um quadrado central onde foi traçado um triângulo em cujas extremidades foram fixados os sensores. Os sensores externos foram posicionados no centro geométrico da base das plataformas. As Figuras 19A, 19B e 19C mostram o posicionamento dos sensores nas plataformas.

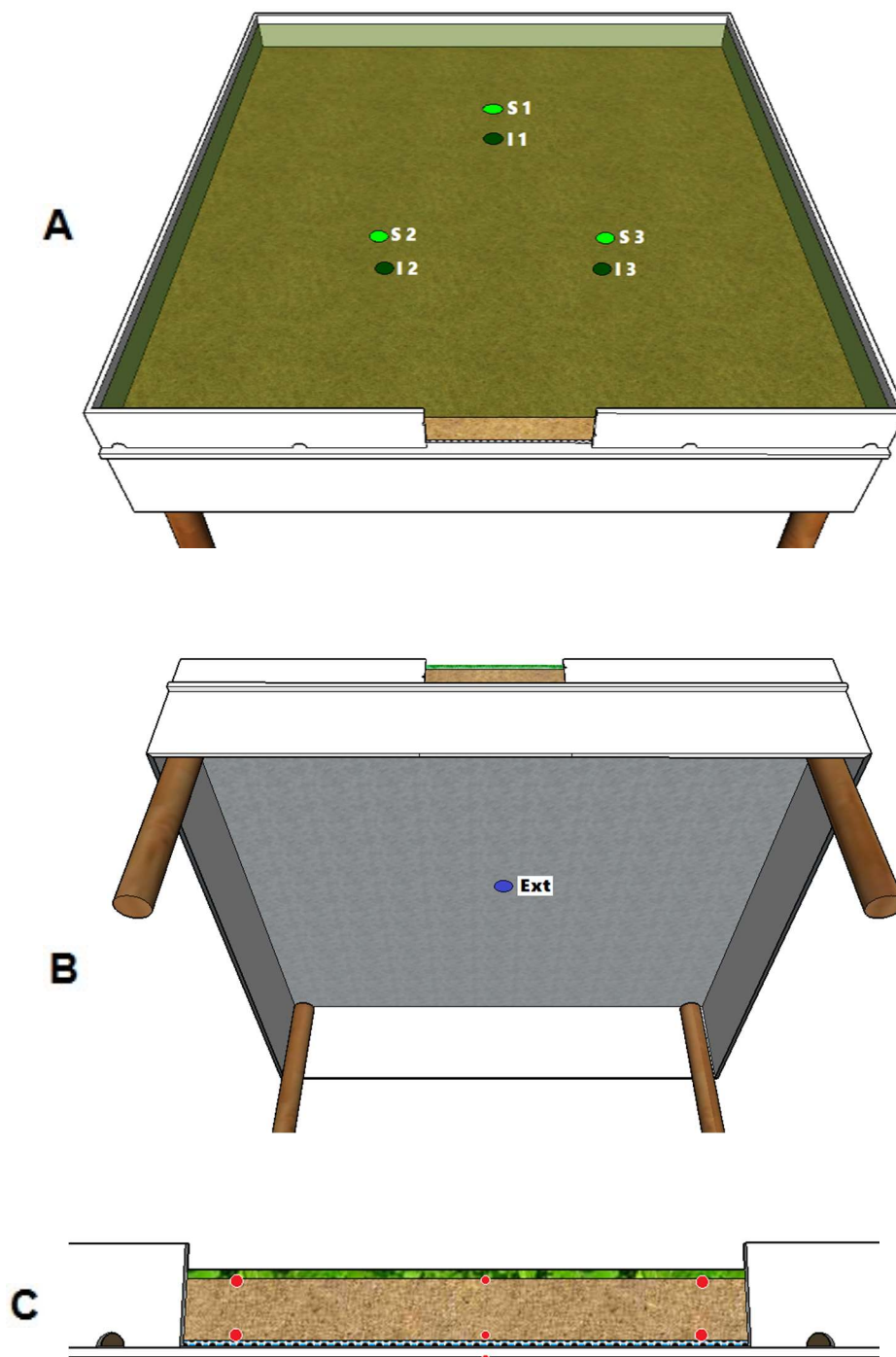


Figura 19: (A) Representação com a indicação do posicionamento dos sensores superiores e inferiores no substrato; (B) do sensor externo nas plataformas e (C) corte mostrando o posicionamento dos sensores. Fonte: Arquivo do autor.

Em ambas as plataformas, os sensores superiores foram fixados abaixo de uma camada de 0,5cm de substrato, para evitar interferência nas medições pela incidência direta da radiação solar; os sensores inferiores, fixados a 0,10m de profundidade, e os sensores externos fixados na superfície da base externa das plataformas, em um pequeno orifício, e protegido com pasta térmica. (Figuras 20A, 20B e 20C).



Figura 20: Posicionamento dos sensores superiores: (A) na cobertura verde, (B) na cobertura controle e (C) inferiores das plataformas. Fonte: Arquivo do autor.

Os dados foram coletados através do programa *PC200W* (Campbell Scientific Inc), que os armazena em arquivos extensão *.dat*, sendo descarregados semanalmente e, então, convertidos para arquivos extensão *.xlsx* e tabulados em planilhas diárias para análise estatística e plotagem dos gráficos com o programa *Excel* (Microsoft Corp.), para melhor visualização e entendimento das variações.

4.4 Análise dos valores de temperatura

Para a análise do comportamento térmico, conforme proposto nos objetivos (ietm 2.2.), foi utilizada a média aritmética dos valores registrados pelos 3 sensores de cada superfície do substrato (superior e inferior) e também os valores das superfícies externas de ambas as plataformas simultaneamente, permitindo-se, assim, comparar os valores entre os dois níveis do substrato ao longo do período de análise. Os valores obtidos foram denominados como Temperatura Verde Superior (θ_{VS}), Temperatura Verde Inferior (θ_{VI}), Temperatura Verde Externa ($\theta_{V\ Ext}$) Temperatura Controle Superior (θ_{CS}), Temperatura Controle Inferior (θ_{CI}) e Temperatura Controla Externa ($\theta_{C\ Ext}$).

4.5 Análise estatística

Os valores das totalizações obtidas por cada um dos 3 sensores superiores e inferiores foram submetidos a um teste estatístico (Teste de Grubbs), com o uso do programa *Action Stat* (Estaticamp), para se verificar a presença de valores extremos entre eles, quando do cálculo da média dos valores de temperatura. Valores extremos (*outliers*) podem ser considerados como manifestações da variabilidade aleatória inerente aos dados, ou apenas um erro no cálculo durante o recolhimento dos dados e até mesmo uma anotação precipitada pelo operador (GRUBBS, 1969).

Em todos os critérios para se testar valores extremos, desenvolve-se o cálculo numérico amostral (estatística) e compara-se com um valor crítico baseado na teoria de amostras aleatórias, para decidir se existe ou não uma observação considerada de valor extremo.

No teste de Grubbs, a estatística é obtida pela Equação 04:

$$Z = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s} \quad \text{Equação 04}$$

onde:

x_i : é uma observação da amostra x_1, x_2, \dots, x_n ;

\bar{x} : é a média amostral;

s : é o desvio padrão amostral.

Esta estatística testa as seguintes hipóteses:

H_0 : x_i é uma observação considerada de valor extremo.

H_1 : x_i não é uma observação considerada de valor extremo.

Rejeita-se a hipótese H_0 com nível de significância α , $Z > Z_c$. O nível de significância adotado nos testes foi de 0,05. Z_c é um valor crítico baseado na distribuição de Z e encontra-se na tabela de valores de $\alpha = 0,1$ e 0,05. (Apêndice A).

4.6 Análise episódica dos tipos de tempo

Os dados das variáveis climáticas foram coletados pela estação meteorológica automática do CRHEA, composta por um conjunto de sensores específicos conectados a um *datalogger* CR1000 (Campbell Scientific Inc) programado para obter medições dos sensores a cada 30 segundos, com totalização a cada 30 minutos. Foram utilizados registros de radiação solar global por meio de um piranômetro (modelo LI-COR LI200X), de temperatura máxima, mínima e umidade relativa do ar por meio de um termo-higrômetro (modelo HMP45C), de pressão atmosférica por meio de um barômetro (modelo Vaisala PTB110), de precipitação por meio de um pluviômetro TE525WS e de velocidade e direção do vento por meio de um anemômetro e anemoscópio (modelo RM03002-L).

O regime climático local foi analisado na forma de episódios representativos, de acordo com a adaptação de Vecchia (1997) da definição de Tipos de Tempo de Monteiro (1969), em que são considerados os dados meteorológicos tomados em superfície junto às propriedades das massas de ar que atuam sobre um determinado local, permitindo que seja determinada a fase mais apropriada à realização de experimentos diante da necessidade de

uma análise climática voltada ao estudo do comportamento térmico de um sistema de cobertura e, no caso do presente trabalho, da sua reação frente ao calor. Para essa investigação da variação do clima em episódios, a análise rítmica se torna apropriada, tanto por suas possibilidades de representação das variações cronológicas dos elementos atmosféricos num dado espaço (ou lugar) como, ainda, pela premissa que encerra, isto é, de que apenas a partir da escala diária é possível associar a variação dos elementos do clima com os tipos de tempo que se sucedem (MONTEIRO, 1971 *apud* ALVES, 2016).

Utilizou-se também como referência as Normais Climatológicas 1961 – 1990 (1992), computadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), revisadas e ampliadas em 2009 e que abrange 414 estações meteorológicas de superfície em operação durante anos do período entre 01/01/1961 a 31/12/1990, cobrindo um conjunto de 26 parâmetros meteorológicos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise do período de coleta

Conforme exposto na Metodologia, o episódio climático representativo selecionado para análise foi registrado entre os dias julianos 288 a 294 (15 a 21/10/2015), dias em que a região esteve sob o domínio de uma massa de ar de característica quente e seca e de onde foram extraídos os dias típicos experimentais.

Para a identificação das massas atuantes, foram avaliados os dados das principais variáveis climáticas do período por meio de gráficos (Figura 21) e com confirmação da massa atuante no Estado de São Paulo, identificada por meio de imagens do satélite GOES-13 (Geostationary Operational Environmental Satellite), fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CEPTEC-INPE) e das cartas sinóticas fornecidas pela Marinha do Brasil, as quais permitiram a visualização do movimento das massas sobre a região Sudeste do país, onde as áreas brancas indicam a presença de nuvens (Figuras 22A e 22B).

Domínio da mTc

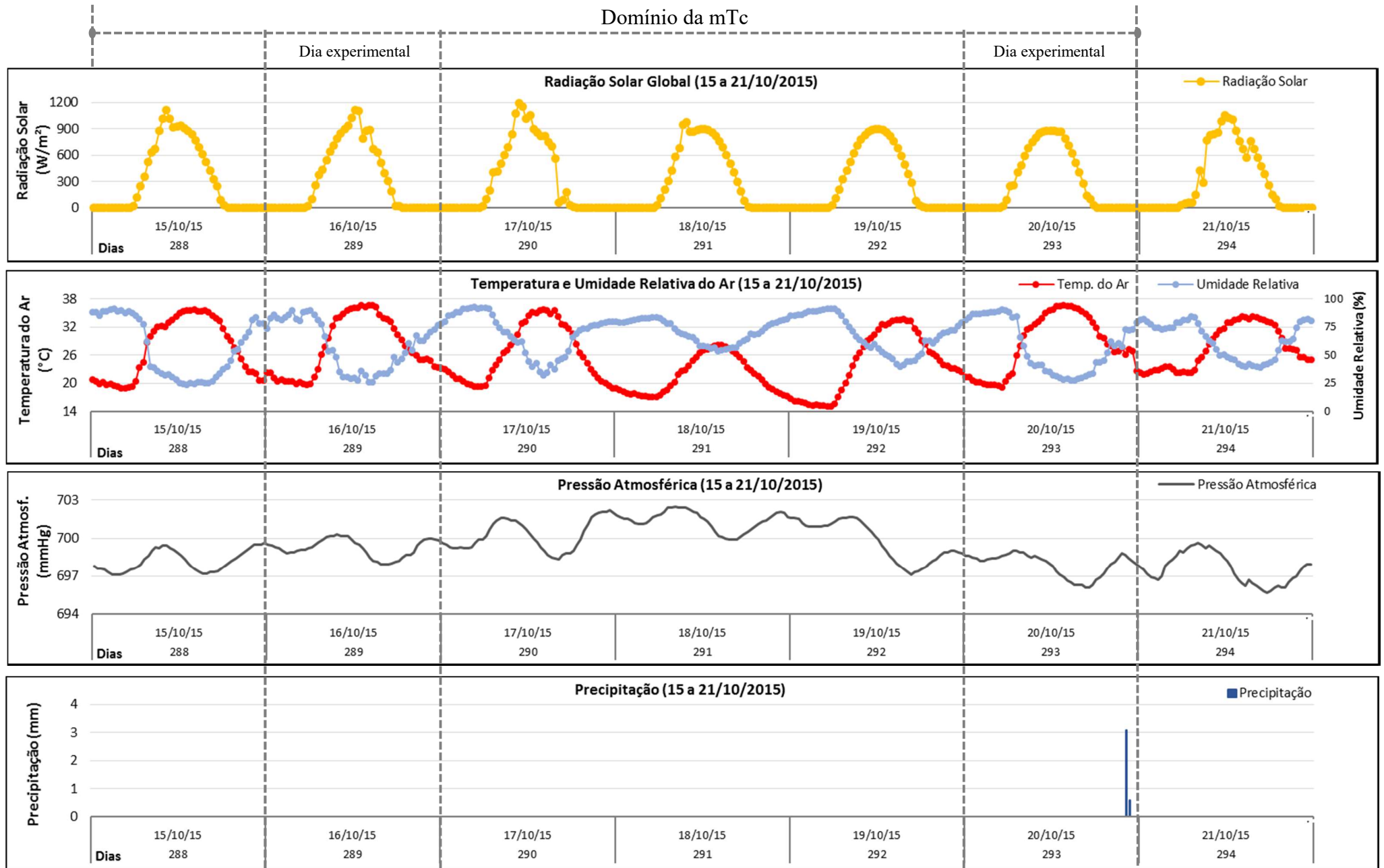


Figura 21: Análise rítmica do período de 15 a 21/10/2015 com as principais variáveis climáticas. Fonte: arquivo do autor.

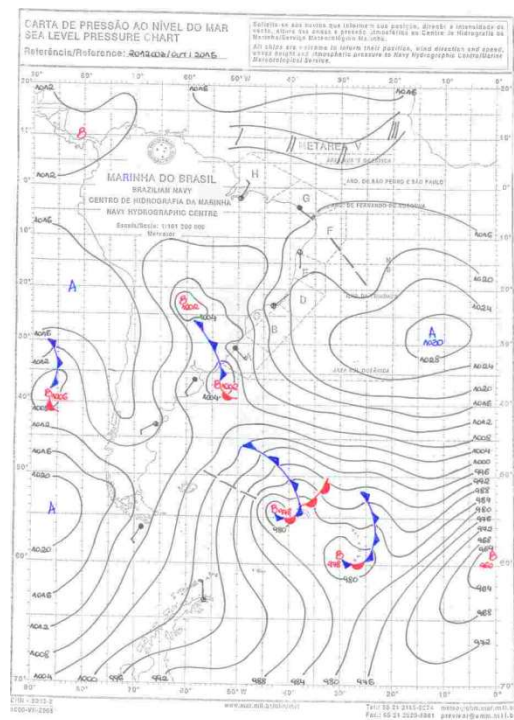
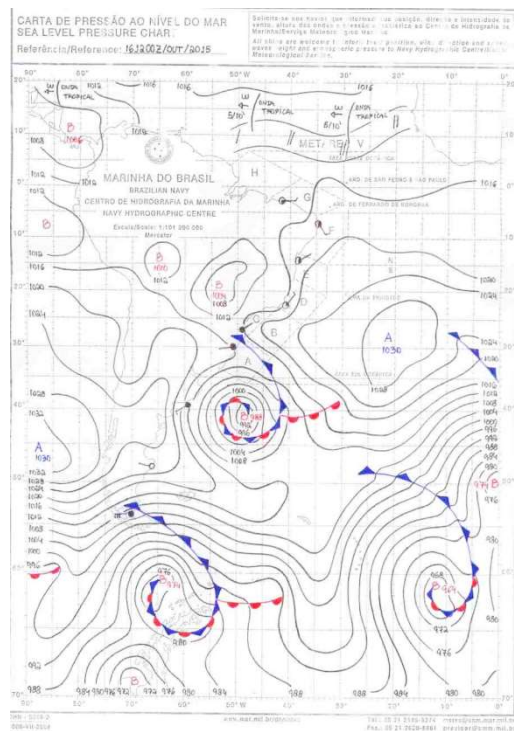


Figura 22: Imagens do satélite e cartas sinóticas mostrando a atuação das massas de ar: (A) 16/10/2015 e (B) 20/10/2015. Fonte: Arquivo do autor.

Com base nas análises das imagens de satélite e das cartas sinóticas, foi identificado o predomínio da massa Tropical Continental entre os dias 15 e 21, período em que foram registrados os mais elevados valores de temperatura do ar no mês. Durante este período, a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) encontrava-se a oeste do continente (INPE, 2015). A partir do dia 21, nota-se o aumento da nebulosidade e dos valores de umidade relativa do ar,

redução da temperatura e ocorrência de precipitação devido à entrada de uma massa de ar úmida no Estado.

Durante o mês de outubro, as chuvas foram mais acentuadas na Região Sul do Brasil, como esperado em anos de El Niño. A escassez de chuva na maior parte do Brasil resultou em elevadas temperaturas e baixos valores de umidade relativa do ar (INFOCLIMA, 2015).

Após a análise dos episódios atmosféricos ocorridos no período, os dias 16 e 20 de outubro foram tomados como dias de referência para o estudo do comportamento térmico do sistema de telhado verde quando, em ambos os dias, a temperatura do ar atingiu o valor de 36,6°C, superior à temperatura máxima absoluta para o mês de outubro registrado em 1963 com valor de 36,4°C, obtida das Normais Climatológicas para São Carlos de 1961 – 1990. A Figura 23 e a Tabela 02 apresentam a variação dos valores da temperatura externa do ar registrados nos dias 16 e 20 de outubro.

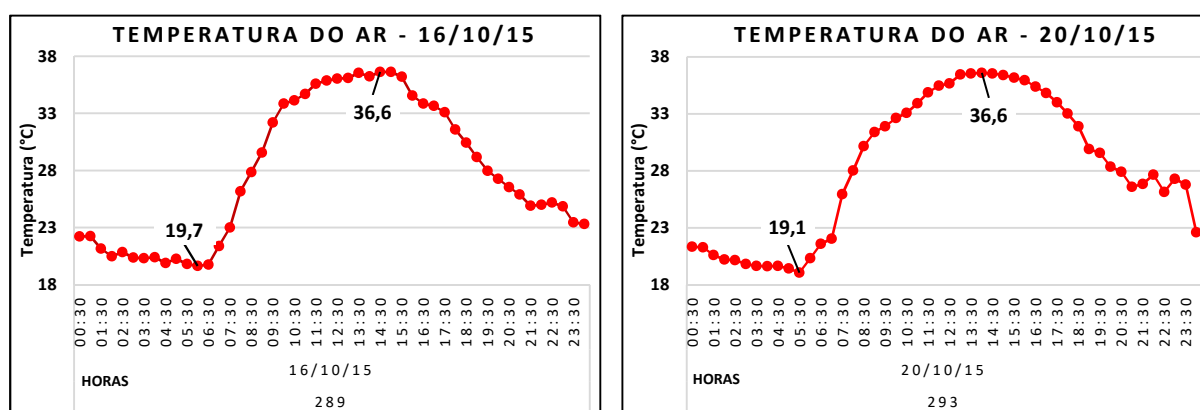


Figura 23: Gráficos da variação da temperatura do ar nos dias 16 e 20 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.

Tabela 2: Valores da temperatura máxima e mínima do ar e a amplitude térmica para os dias 16 e 20 de outubro.

Data	T Ar máx (°C) (hora)	T Ar mín (°C) (hora)	ΔT (°C)
16/10	36,6 (14h30)	19,7 (6h00)	16,9
20/10	36,6 (14h30)	19,1 (5h30)	17,5

Além dos elevados valores de temperatura do ar, os dias típicos experimentais apresentaram céu limpo com valores de radiação solar global máxima atingindo 1113 W/m², às 12h30, no dia 16 e 880 W/m², às 12h00, no dia 20 (Figura 24).

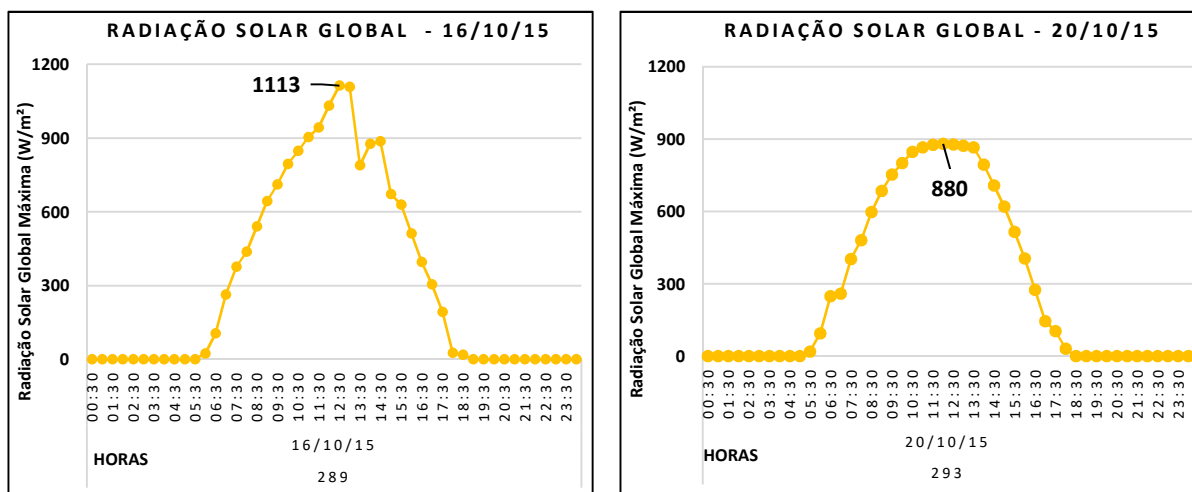


Figura 24: Gráficos da radiação solar global máxima nos dias 16 e 20 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.

O gráfico da radiação do dia 16 apresenta uma queda dos valores entre 12h30 e 13h30 devido à presença de nebulosidade no período. Já no dia 20, o gráfico apresenta uma parábola característica de dias sem nebulosidade.

A seguir, serão apresentados os resultados das principais análises do comportamento térmico do sistema de cobertura verde e do sistema controle para os dias típicos experimentais de calor.

5.2 Análise dos dados das plataformas verde e controle

Após a verificação da consistência dos registros submetidos ao teste estatístico, nenhum valor extremo foi identificado e então se iniciou a análise dos dados das temperaturas superficiais. Para a análise do comportamento térmico dos sistemas de cobertura, os valores obtidos foram plotados na forma de gráficos, mostrando a variação da temperatura do ar, das temperaturas superficiais superior e inferior do substrato e dos sensores externos das plataformas verde e controle. As Figuras 25 e 26 e a Tabela 03 mostram as temperaturas referentes ao dia experimental de 16 de outubro.

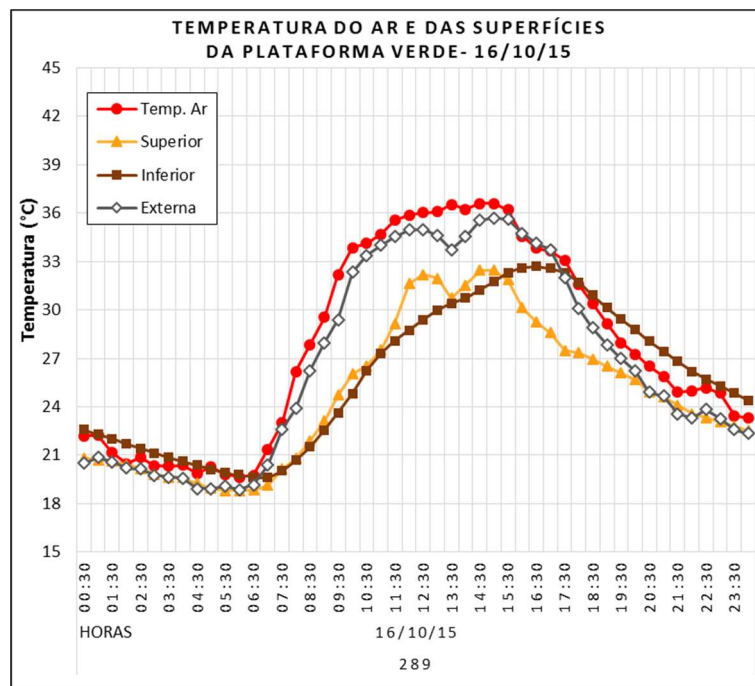


Figura 25: Gráficos dos valores das temperaturas do ar, das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma verde no dia 16 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.

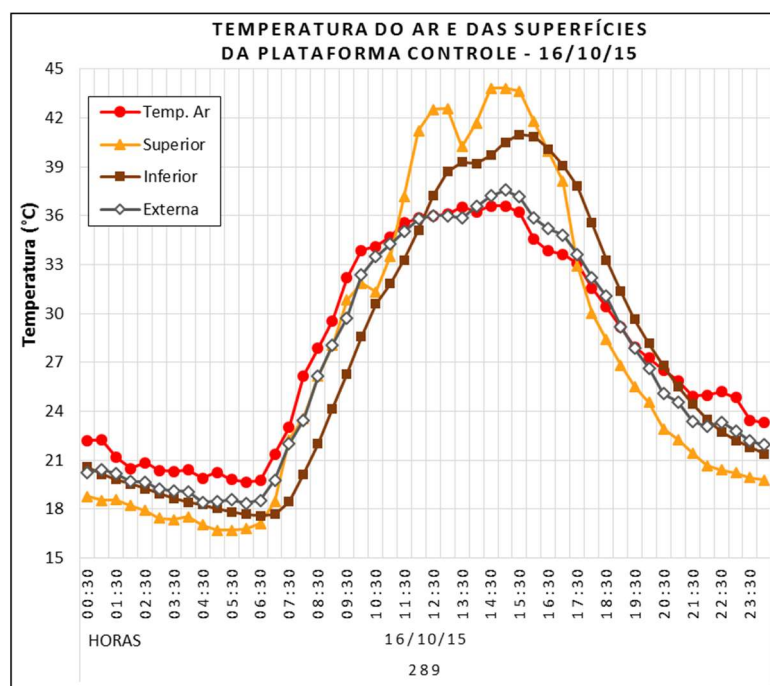


Figura 26: Gráficos dos valores das temperaturas do ar, das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma controle no dia 16 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.

Tabela 3: Valores e respectivos horários da temperatura máxima, mínima e a amplitude térmica do ar, das superfícies superiores e inferiores e dos sensores externos das plataformas verde e controle no dia 16 de outubro.

Indicadores	Ar	θ_{VS}	θ_{VI}	$\theta_{V Ext}$	θ_{CS}	θ_{CI}	$\theta_{C Ext}$
Máx (°C) (hora)	36,6 (14h30)	32,5 (14h30)	32,7 (16h30)	35,7 (15h00)	43,8 (14h30)	41,0 (15h30)	37,6 (15h00)
Mín (°C) (hora)	19,7 (6h00)	18,8 (6h30)	19,6 (7h00)	18,9 (6h00)	16,7 (5h30)	17,6 (6h30)	18,4 (6h00)
ΔT (°C)	16,9	13,7	13,1	16,8	27,1	23,4	19,2

Verificou-se na cobertura verde que o valor da temperatura máxima da superfície inferior foi registrado 2h00 após o registro da temperatura máxima da superfície superior, superando-a em apenas 0,2°C. Nas superfícies superior e inferior foram registrados valores de temperatura máxima de 4,1°C e 3,9°C abaixo da temperatura máxima do ar, respectivamente. A amplitude térmica da superfície superior foi semelhante àquela apresentada pela superfície inferior, superando-a em apenas 0,6°C.

Na cobertura controle a temperatura máxima da superfície inferior foi registrada 1h00 após o registro da temperatura máxima da superfície superior, com valor de 2,8°C menor. Os valores das temperaturas máximas da superfície superior e inferior superaram a temperatura máxima do ar em 7,2°C e 4,4°C, respectivamente, e a amplitude térmica da superfície superior foi 3,7°C maior do que a da superfície inferior. Nota-se que a amplitude térmica das duas superfícies da cobertura verde é menor do que a amplitude das duas superfícies da cobertura controle.

Os valores da temperatura máxima superficial superior de ambas as coberturas e da temperatura máxima do ar foram registrados no mesmo horário e apresentaram maiores amplitudes térmicas em relação aos inferiores. Porém, os valores registrados, tanto na superfície superior, quanto na inferior da cobertura verde, foram menores que os registrados nas superfícies superior e inferior da cobertura controle.

Os sensores das superfícies externas de ambas as plataformas registraram temperaturas máximas no mesmo horário e com um atraso térmico de 1h00 em relação à temperatura máxima do ar, quando o sensor da plataforma verde registrou uma temperatura de 0,9°C abaixo da temperatura do ar e o sensor da plataforma controle registrou 1,0°C acima da temperatura do ar. Comparadas as temperaturas máximas, o sensor da plataforma controle registrou valor de 1,9°C acima do sensor da plataforma verde, que por sua vez apresentou uma amplitude térmica de 2,4°C menor do que o sensor da plataforma controle.

Os valores de temperatura registrados pelos sensores das superfícies superiores, de ambas as plataformas, apresentaram maior amplitude térmica no momento em que foram comparados com os valores registrados pelos sensores inferiores de suas respectivas plataformas.

Isto ocorre devido à influência da radiação solar que incide nas superfícies superiores que, uma vez exposta a ela, respondem às suas variações. Essa influência ficou evidenciada quando os valores de temperatura da superfície superior das duas plataformas diminuíram após uma queda nos valores de radiação entre 13h00 e 13h30, conforme mostrado nas Figuras 27 e 28.

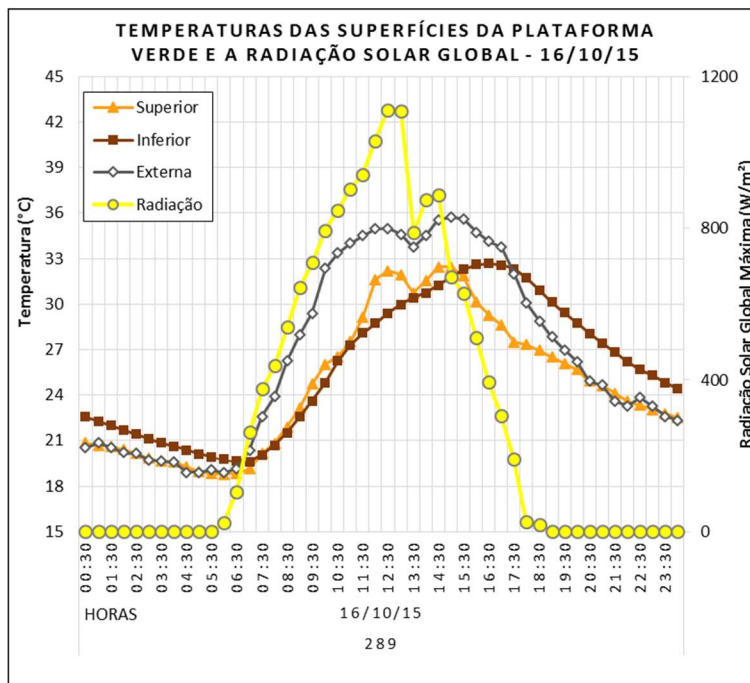


Figura 27: Gráficos dos valores de temperatura das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma verde e a radiação solar global máxima no dia 16 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.

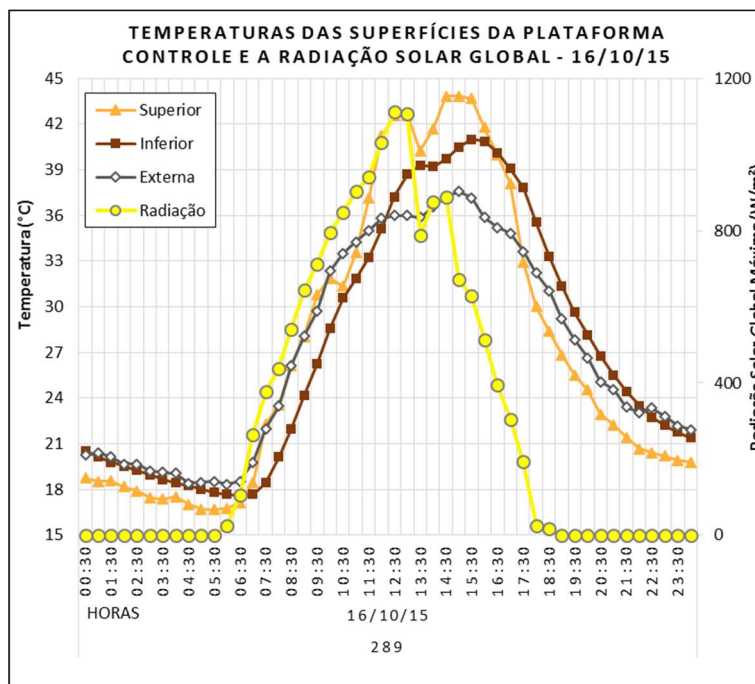


Figura 28: Gráficos dos valores de temperatura das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma controle e a radiação solar global máxima no dia 16 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.

As superfícies superiores apresentaram reduções de 1,8°C na cobertura verde e 2,3°C na cobertura controle, voltando a registrar elevação da temperatura nessas superfícies conforme os valores de radiação voltaram a aumentar. A temperatura da superfície inferior da cobertura verde não responde a essa variação observada na superfície superior, durante o mesmo período. Porém, pode-se verificar na cobertura controle que a temperatura da superfície inferior tem a sua tendência de aumento interrompida, permanecendo estável durante o período e voltando a aumentar seguindo a mesma tendência da superfície superior. A temperatura da superfície externa da plataforma verde apresentou uma redução de 1,3°C, enquanto a temperatura da superfície externa da plataforma controle permaneceu estável durante o mesmo período de redução da radiação. A seguir são apresentados os gráficos das Figuras 29 e 30 e a Tabela 04, para a análise do comportamento térmico dos sistemas de cobertura verde e controle no dia experimental de 20 de outubro, os quais mostram a variação das temperaturas do ar e das superfícies superior, inferior e externa.

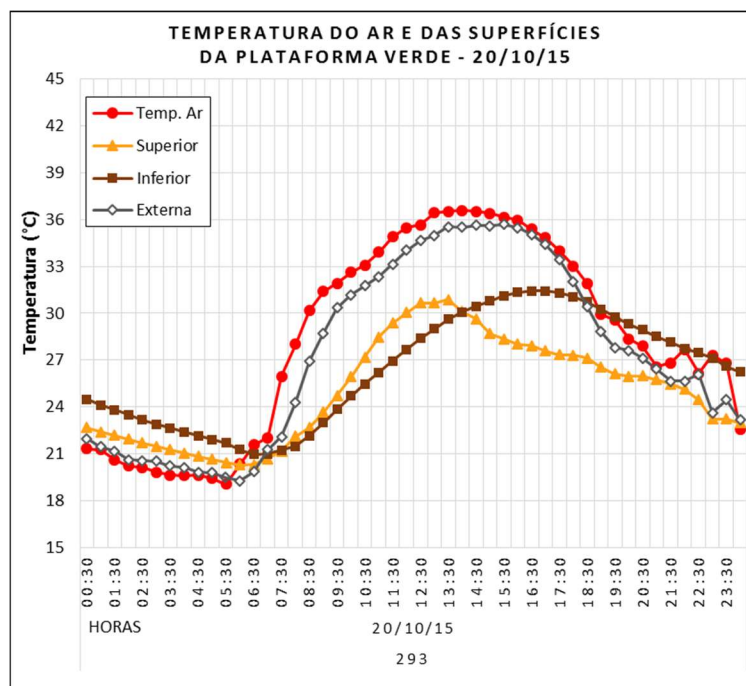


Figura 29: Gráficos dos valores das temperaturas do ar, das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma verde no dia 20 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.

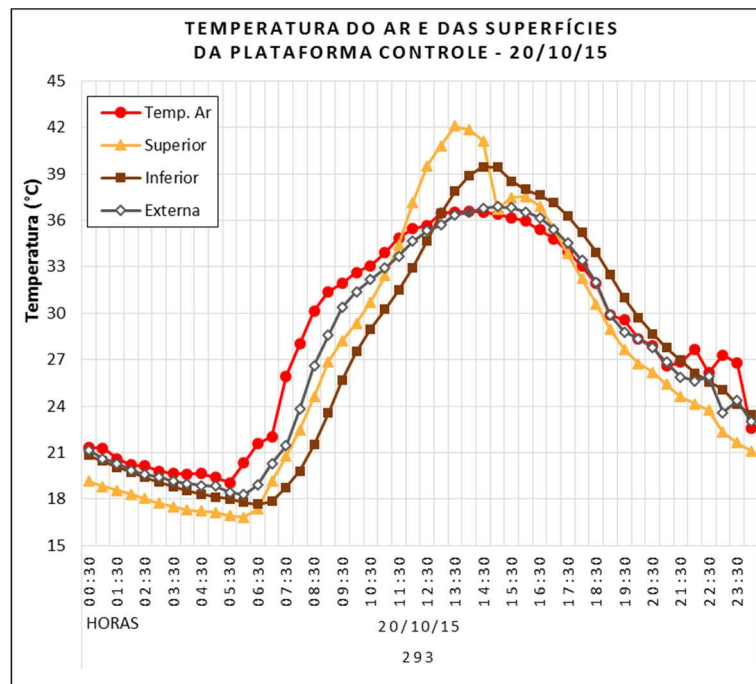


Figura 30: Gráficos dos valores das temperaturas do ar, das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma controle no dia 20 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.

Tabela 4: Valores e respectivos horários da temperatura máxima, mínima e a amplitude térmica do ar, das superfícies superiores e inferiores e dos sensores externos das plataformas verde e controle no dia 20 de outubro.

Indicadores	Ar	θVS	θVI	θV Ext	θCS	θCI	θC Ext
Máx (°C) (hora)	36,6 (14h30)	30,9 (13h30)	31,4 (16h30)	35,7 (15h30)	42,1 (13h30)	39,4 (15h00)	36,8 (15h30)
Mín (°C) (hora)	19,1 (5h30)	20,3 (6h00)	21,0 (7h00)	19,3 (6h00)	16,8 (6h00)	17,7 (6h30)	18,3 (6h00)
ΔT (°C)	17,5	10,6	10,4	16,4	25,3	21,7	18,5

Neste dia experimental, os valores da temperatura máxima das superfícies superiores de ambas as plataformas foram registrados 1h00 antes da temperatura máxima do ar. Na cobertura verde, o valor da temperatura máxima da superfície inferior foi registrada 3h00 após o registro da temperatura máxima da superfície superior, superando-a em apenas 0,5°C. Nas superfícies superior e inferior foram registrados valores de temperatura máxima de 5,7°C e 5,2°C abaixo da temperatura máxima do ar, respectivamente, sendo que a amplitude térmica da superfície superior foi maior do que a da superfície inferior em apenas 0,2°C.

Na cobertura controle, a temperatura máxima da superfície inferior foi registrada 1h30 após o registro da temperatura máxima da superfície superior e com valor de 2,7°C menor. Os valores das temperaturas máximas da superfície superior e inferior da cobertura superaram a temperatura máxima do ar em 7,2°C e 4,4°C, respectivamente, e a amplitude térmica da superfície superior foi 3,7°C maior do que a dos valores da superfície inferior.

Os sensores das superfícies externas de ambas as plataformas registraram temperaturas máximas no mesmo horário com um atraso térmico de 1h00, em relação à temperatura máxima do ar, quando o sensor da plataforma verde registrou uma temperatura 0,9°C abaixo da temperatura do ar e o sensor da plataforma controle 0,2°C acima da temperatura do ar. O sensor da plataforma verde apresentou uma amplitude térmica 2,1°C menor do que o sensor da plataforma controle. Os valores de temperatura das superfícies acompanharam a variação da radiação sem a presença de nebulosidade, conforme mostrado nas Figuras 31 e 32.

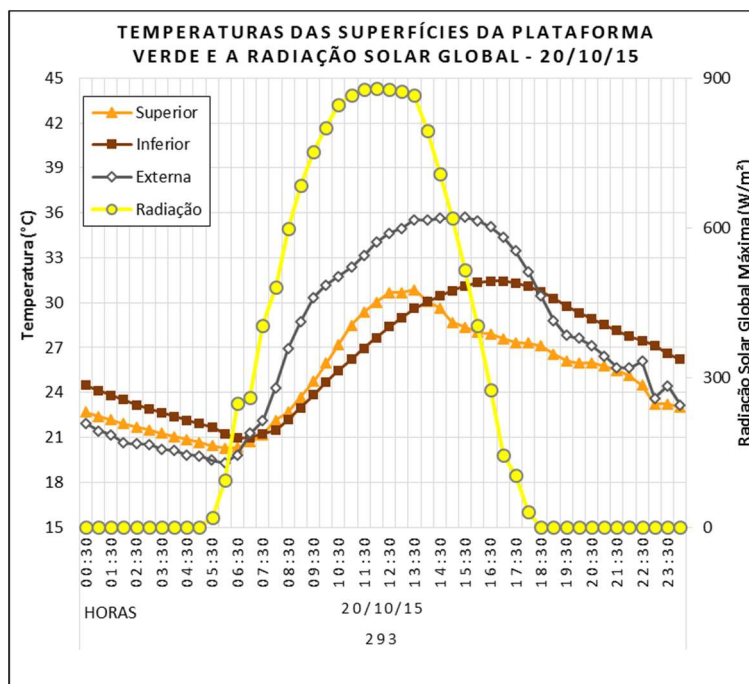


Figura 31: Gráficos dos valores de temperatura das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma verde e a radiação solar global máxima no dia 20 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.

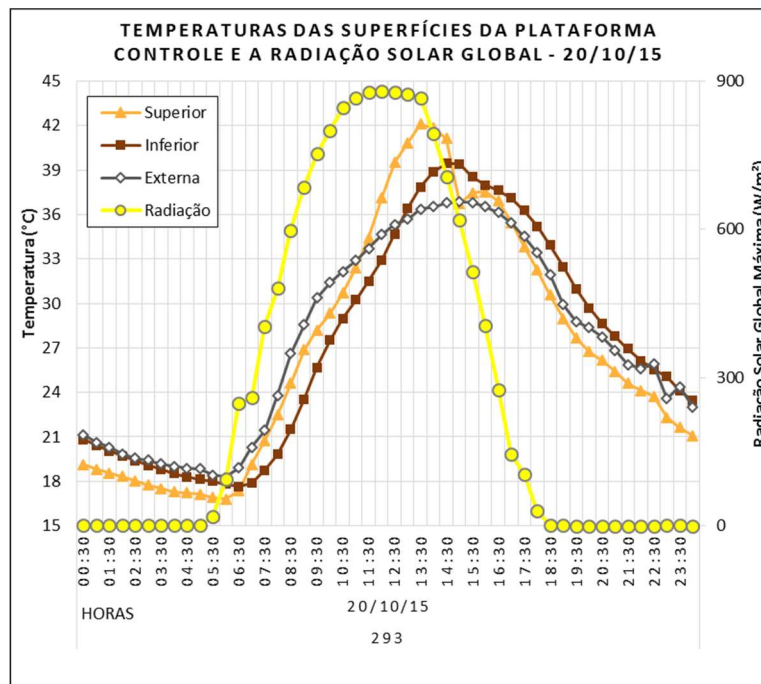


Figura 32: Gráficos dos valores de temperatura das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma controle e a radiação solar global máxima no dia 20 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.

Analisando os gráficos, pode-se notar que a radiação solar é o principal fator que determina a transferência de calor, a partir da superfície superior, para dentro das camadas inferiores do substrato pela termoconversão, resultando no aumento da temperatura destas superfícies durante o período diurno, assim como na diminuição das suas temperaturas pela perda da energia térmica acumulada para a atmosfera - quando cessa a incidência pela presença de nebulosidade - e durante o período noturno. Essa amplitude térmica foi menor nas duas superfícies da plataforma verde do que aquela registrada na plataforma controle, assim como foi menor também a diferença entre as temperaturas máximas das duas superfícies na cobertura verde.

Na cobertura da plataforma verde observa-se nos, dois dias experimentais, que no horário em que a temperatura da superfície inferior atinge o seu valor máximo, às 16h30 em ambos os dias, a temperatura da superfície superior já se encontrava abaixo deste valor, tendo atingido seu valor máximo, anteriormente, e, em relação à temperatura da superfície externa da plataforma, estava maior do que a da superfície inferior. A Tabela 05 mostra as temperaturas das superfícies da plataforma verde, no horário da máxima temperatura da sua superfície inferior nos dois dias experimentais.

Tabela 5: Temperaturas das superfícies superior, inferior e externa da plataforma verde no horário da máxima temperatura da superfície inferior nos dois dias experimentais.

Indicadores	θVS (hora)	θVI (hora)	θV Ext (hora)
Temperatura superficial 16/10/15 (°C)	29,3 (16h30)	32,7 (16h30)	33,8 (16h30)
Temperatura superficial 20/10/15 (°C)	27,9 (16h30)	31,4 (16h30)	35,4 (16h30)

No dia 16, quando a temperatura da superfície inferior atingiu o seu valor máximo, ele supera a temperatura da superfície superior em 3,4°C e é superado pela superfície externa em 1,1°C. No dia 20 a temperatura da superfície inferior atingiu o seu valor máximo no momento em que superou a temperatura da superfície superior em 3,5°C e foi superado pela temperatura da superfície externa em 4,0°C.

Em relação à cobertura da plataforma controle pode-se observar nos dois dias experimentais que no horário em que a superfície inferior atingiu sua temperatura máxima ela não superou o valor registrado pela superfície superior mas ficou acima da temperatura da superfície externa. A Tabela 06 mostra as temperaturas das superfícies da plataforma controle no horário da máxima temperatura da superfície inferior nos dois dias experimentais.

Tabela 6: Temperaturas das superfícies superior, inferior e externa da plataforma controle no horário da máxima temperatura da superfície inferior nos dois dias experimentais.

Indicadores	θCS (hora)	θCI (hora)	θC Ext (hora)
Temperatura superficial 16/10/15 (°C)	43,7 (16h30)	41,0 (15h30)	37,2 (16h30)
Temperatura superficial 20/10/15 (°C)	41,1 (14h30)	39,4 (14h30)	36,8 (14h30)

No dia 16, no horário em que a temperatura da superfície inferior atingiu o seu valor máximo a temperatura da superfície superior estava 2,7°C acima deste valor e a temperatura da superfície externa estava 3,8°C abaixo deste valor. No dia 20, a temperatura da superfície inferior atingiu o seu valor máximo quando as temperaturas das superfícies superior e externa se encontravam 1,7°C acima e 2,6°C abaixo deste valor respectivamente.

Analisando a variação da temperatura da superfície externa das duas plataformas nos dois dias experimentais, os valores registrados na plataforma verde somente superam a temperatura do ar em 0,3°C, às 16h30, no dia 16, permanecendo abaixo no restante do período em ambos os dias. Na plataforma controle, a temperatura externa supera a temperatura do ar no dia 16, entre 14h30 e 18h30, com diferença máxima às 16h30 de 1,4°C acima. No dia 20, supera a temperatura do ar entre 14h30 e 18h00 com diferença máxima de 0,8°C, às 16h30. As Figuras 33 e 34 mostram a variação das temperaturas da superfície externa das plataformas nos dois dias.

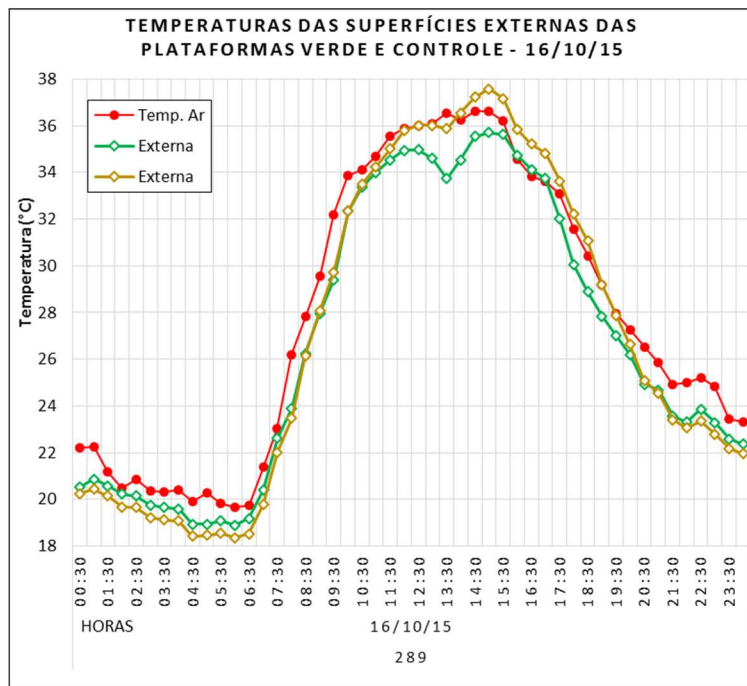


Figura 33: Gráficos dos valores das temperaturas do ar e da superfície externa das plataformas verde e controle no dia 16 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.

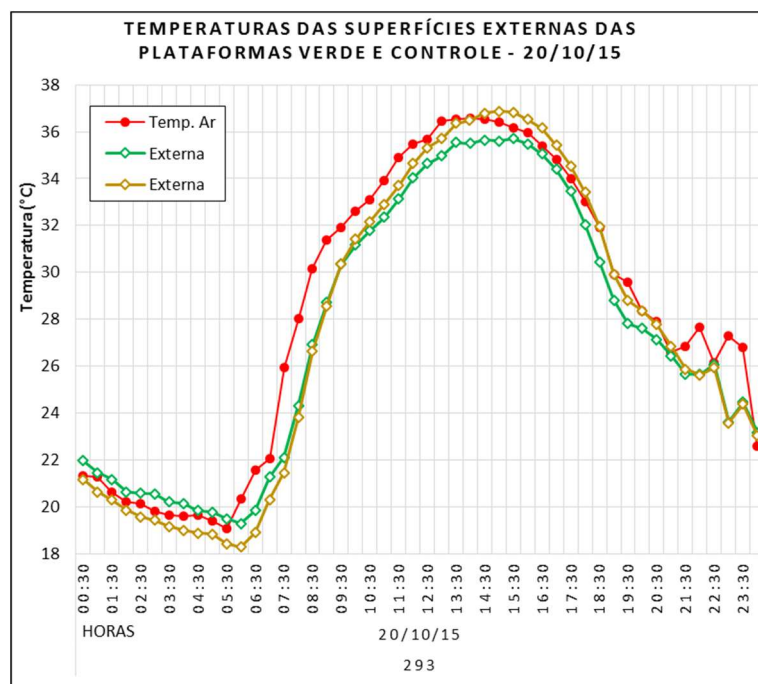


Figura 34: Gráficos dos valores das temperaturas do ar e da superfície externa das plataformas verde e controle no dia 20 de outubro. Fonte: Arquivo do autor.

Embora sejam pouco significativas as diferenças de temperatura entre as superfícies externas das plataformas em relação à temperatura do ar, pode-se perceber que nos dois dias experimentais elas acompanham as tendências das respectivas coberturas, nas quais, na plataforma verde, a temperatura máxima da superfície externa não supera a temperatura

máxima do ar e, na plataforma controle, a temperatura máxima da superfície externa supera a temperatura máxima do ar.

Ressalta-se que o melhor desempenho térmico pela cobertura verde, por ter apresentado menores valores de temperatura no perfil do substrato quando comparado com a cobertura sem vegetação, se deve tanto pelo sombreamento proporcionado pela camada foliar quanto pelo maior albedo dessa camada efeito da evapotranspiração. O sombreamento bloqueia parte da radiação incidente e favorece a retenção da umidade no substrato, que perde energia térmica através da evapotranspiração. Na ausência de uma cobertura vegetal, o substrato exposto retém menos umidade que seria evaporada durante o dia e também absorve mais radiação por ser mais escuro do que a camada foliar. Para a obtenção de um melhor desempenho térmico, em uma cobertura verde, torna-se importante a escolha do tipo de vegetação a ser utilizada, que deve priorizar espécies com maior área de cobertura foliar horizontal e com maior taxa de transpiração.

Estes resultados estão de acordo com aqueles obtidos do trabalho conduzido por Blanusa et al (2013), durante o verão na Inglaterra, no qual puderam concluir que a utilização de sistemas de cobertura verde com espessura de substrato com espessura mínima de 0,12m, vegetação com folhagem densa e irrigação periódica se justifica pelo melhor desempenho na redução da temperatura nas camadas de substrato abaixo da vegetação. Isso se deve à maior refletância da radiação pela camada foliar e maior taxa de transpiração, ao invés da utilização de substratos mais rasos e vegetação tolerante à seca, mas que possuem taxas de transpiração reduzidas e folhagem esparsa, as quais permitem maior exposição do substrato à radiação. Em um trabalho de avaliação do potencial de uso de espécies vegetais para uso em coberturas verdes, conduzido durante o verão em Itirapina-SP, Beatrice (2011) verificou que substratos de menor espessura são mais dependentes da cobertura foliar para minimizar seu aquecimento. Resultados semelhantes também foram obtidos por Coutts et al (2013), durante a primavera e o verão australiano, no qual sugerem que coberturas verdes irrigadas periodicamente fornecem melhores benefícios em termos de desempenho térmico e de retenção de umidade no substrato, do que se forem utilizadas regime de irrigação limitado, assim como evitar a exposição do substrato que, devido ao albedo reduzido, absorve mais essa radiação e também retém menos umidade.

O uso de coberturas verdes em edificações requer parâmetros que auxiliem no dimensionamento dos sistemas e permitam quantificar o seu desempenho térmico. O presente trabalho contribuiu com os estudos de sistemas de cobertura verde para o uso na construção civil ao fornecer parâmetros em relação à amplitude e atraso térmicos de um conjunto formado por uma camada de substrato composto por materiais de uso comercial e com

espessura suficiente para suportar uma vegetação de cobertura foliar densa, nativa do Brasil, e que confere um bom desempenho térmico em períodos de calor, características desejáveis em sistemas extensivos de cobertura verde.

A avaliação do uso de espécies adaptadas ao clima e local que possuam elevado índice de cobertura foliar e pouca exigência à irrigação, a utilização de sistemas autônomos irrigação e reutilização de água e a utilização de plataformas de teste em alvenaria para realização de experimentos comparativos em maior quantidade, são alguns temas sugeridos para futuros trabalhos a fim de se obter mais dados sobre esta técnica construtiva no Brasil para a melhora do conforto térmico nos ambientes construídos, assim como se sugere também mais estudos que envolvam a avaliação da influência das coberturas verdes na temperatura e umidade nos centros urbanos.

6 CONCLUSÃO

Buscou-se, nesta investigação, analisar o comportamento térmico de um sistema de cobertura verde instalada sobre plataforma de teste, através dos dados de temperatura superficiais da camada superior e inferior do substrato e da superfície externa da base da plataforma, com a finalidade de se conhecer melhor a influência da vegetação no atraso térmico entre estas superfícies e a variação da amplitude das suas temperaturas, em comparação com um sistema controle sem vegetação.

Nos dois dias tomados como referência para o estudo, o atraso térmico entre as duas superfícies na cobertura, superior e inferior, foi maior na cobertura verde do que na cobertura controle. As temperaturas máximas registradas na cobertura verde ficaram abaixo da temperatura máxima do ar, enquanto que, na cobertura controle, as temperaturas superaram a temperatura máxima do ar. A superfície externa da plataforma verde também apresentou temperatura máxima e amplitude térmica menores à temperatura máxima e à amplitude térmica do ar. A temperatura máxima e a amplitude térmica da superfície externa da plataforma superou a temperatura máxima e a amplitude térmica do ar.

A menor amplitude térmica registrada nas duas superfícies da cobertura verde, em comparação com a registrada nas superfícies da cobertura controle, resulta do bloqueio de parte da radiação solar pela vegetação, que tanto impede o ganho de energia térmica pelas camadas inferiores durante o período diurno, como também, impede que parte desta energia seja perdida para o ambiente.

Embora a cobertura da plataforma verde tenha promovido a redução da amplitude e o atraso térmicos da superfície inferior, a temperatura máxima atingida por esta superfície superou a máxima atingida pela superfície superior, ainda que por um valor reduzido, nos dois

dias experimentais. Devido às trocas térmicas entre as superfícies inferior e externa, tanto a superfície externa não atingiu a mesma temperatura máxima do ar por estar próxima a uma superfície com menor temperatura, transferindo para ela a energia térmica que recebe do ambiente; como a temperatura da superfície inferior superou a temperatura da superior no horário em que atingiu o seu valor máximo por ter uma superfície com maior temperatura abaixo dela, recebendo assim esta energia térmica.

Na plataforma controle, o processo de trocas térmicas entre as superfícies inferior e externa permitiu que a temperatura máxima da superfície inferior não alcançasse a temperatura máxima da superior. Quando a superfície inferior atingiu a sua temperatura máxima, a superfície externa se encontrava com temperatura menor, recebendo esta energia térmica, o que fez com que a temperatura desta superfície ultrapassasse a temperatura máxima do ar.

Desta forma, foi possível definir para um dia quente e seco que a cobertura do substrato, com uma camada densa de vegetação, influencia os processos de troca de calor no perfil do substrato pelo bloqueio de parte da radiação solar incidente, fator principal que determina esses processos, permitindo que a superfície superior não atinja temperaturas acima da temperatura máxima do ar diária e também que essa temperatura se manifeste com maior atraso na superfície inferior que, em última análise, é a que estará em contato com um elemento construtivo, como uma laje ou um forro. A nebulosidade também apresentou sensível influência na variação de temperatura, principalmente nas superfícies superiores do substrato.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMAN, J. **Espaço para a alma**. National Geographic Brasil, São Paulo, n.79, p.90–95, out, 2006.

ALVES, E. D. L. **Análise das influências geourbanas no clima urbano da cidade de Iporá – Goiás**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS *NBR 6457/1986* Amostras de Solo – Preparação Para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização, 1986.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de normas de desempenho térmico de edificações 02:135. 07-001 – Parte 1: definições, símbolos e unidades. São Paulo. 2003.

BAPTISTA, C. R. W.; MORETINI, C. A.; MARTINEZ, J. L. **Arachis pintoi, palatabilidade, crescimento e valor nutricional frente ao pastoreio de equinos adultos**. Rev. Acad., Curitiba, v. 5, n. 4, p. 353-357, 2007.

BARBOSA, R. V. **Estudo do campo térmico urbano de São Carlos (SP): análise da intensidade da ilha de calor urbano em episódio climático de verão.** Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

BLANUSA, T.; MONTEIRO, M. M. V.; FANTOZZI, F.; VYSINI, E.; LI, Y.; CAMERON, R. W. F. **Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better ‘cooling service’?** Building and Environment 59, 99-106, 2013.

BEATRICE, C.C. **Avaliação do potencial de uso de três espécies vegetais como cobertura leve de telhados em edificações.** Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

BENEVOLO, L. **História da Arquitetura Moderna.** São Paulo: Editora Perspectiva, 2001.

BERRETTA, C.; POË, S.; STOVIN, V. **Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics.** Journal of Hydrology 511, 374–386, 2014.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Normais climatológicas (1961-1990). Brasília: Departamento Nacional de Meteorologia, 1992.

BRENNEISEN, S. **Space for Urban Wildlife: Designing Green Roofs as Habitats in Switzerland.** Urban Habitats, vol.4, N 1, 2006.

CALLISTER, W. **Materials Science and Engineering - An Introduction.** John Wiley & Sons, INC., 2003.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas.** Campinas, Instituto Agronômico, 77 p, 2009.

CHANG, J. H. **Climate and Agriculture.** 2ª Ed. Chicago: Aldine Publishing Company, 296p., 1971.

CLAYTON, P. A.; PRICE, M. J. **The Seven Wonders of the Ancient World.** New York: Routledge, 179p., 1989.

COLUMBIA GREEN TECHNOLOGIES **Green roof systems.** Disponível em: <<
<http://columbia-green.com/systems/>>> Acessado em: 07/5/2016.

COMMUNITY SOLUTIONS. **“The Power of Community: How Cuba Survived Peak Oil”.** Director: Faith Morgan. The Community Solutions Project. 2006. In: WALDBAUM, H. Green Roofs for a Urban Agricultural, 2008.

CORREA, C. B. **Análisis de la Viabilidad y Comportamiento Energético de la Cubierta Plana Ecológica.** Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

COSTA, E.C.C. **Arquitetura ecológica: condicionamento térmico natural**. São Paulo: Edgard Blücher. p.264, 1982.

COUTTS, A. M.; DALY, E.; BERINGER, J.; TAPPER, N. J. **Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs**. *Building and Environment* 70, 266-276, 2013.

CUNHA, A.P.S.R. **Experimento hidrológico para aproveitamento de águas de chuva usando coberturas verdes leves (CVL)**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 12., 2004, São Paulo. Resumos. São Paulo: USP. 1 CD-ROM, 2004.

CUNHA, D. G. F.; VECCHIA, F. **As abordagens clássica e dinâmica de clima: uma revisão bibliográfica aplicada ao tema da compreensão da realidade climática**. *Ciência e Natura*, UFSM, 29 (1): 137-149, 2007

DE LORME, E. **Garden pavilions and the 18th century french court**. Suffolk: Antique, 1996.

DEL BARRIO, E. P. **Analysis of the green roofs cooling potential in buildings**. *Energy in Buildings*, v. 27, n. 2, p. 179-193, 1998.

DINSDALE, S.; PEAREN, B.; WILSON, C. **Feasibility study for green roof application on queen's university campus**. Kingston: Queen's Physical Plant Services. p.58, 2006.

DUNNETT, N; KINGSBURY, N. **Planting Green Roofs and Living Walls**. Portland: Timber Press, 327p, 2008.

DURHMAN, A. K.; ROWE, D. B.; RUGH, C.L. **Effect of Substrate Depth on Initial Growth, Coverage, and Survival of 25 Succulent Green Roof Plant Taxa**. *HortScience* v. 42, n. 3, p.588-595, 2007.

EMILSSON, T. **Extensive Vegetated Roofs in Sweden: Establishment, Development and Environmental Quality**. 2005a. 34f. Tese (Doutorado em horticultura) - Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Science. Department of Landscape Management and Horticultural Technology Alnar. Swedish University of Agricultural Sciences. Sweden, 2005.

EMILSSON, T.; BERNDTSSON, J. C.; MATTSSON, J. E. ROLF, K. **Effect of using conventional and controlled release fertilizer on nutrient runoff from various vegetated roof systems**. *Ecological Engineering*, 29, 260-271. 2007.

EUMORFOPOULOU, E.; ARAVANTINOS, D. **The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece**. *Energy and Buildings* 27 (1) 29–36, 1998.

FARZANEH, R.; JARRETT, A.; BERGHAGE, R. D.; BEATTIE, D. J. **Evapotranspiration Rates from Extensive Green Roof Plant Species**. In: Annual International Meeting Sponsored (ASABE), Flórida, Estados Unidos da América. 2005

FERGUSON, M. E.; JARVIS, A.; STALKER, H. T.; WILLIAMS, D. E.; GUARINO, L.; VALLS, J. F. M.; PITTMAN, R. N.; SIMPSON, C. E.; BRAMEL, P. J. **Biogeography of wild *Arachis Leguminosae*: distribution and environmental characterization. Biodiversity and Conservation**. *Dordrecht*, v. 14, n. 7, p. 1777–1798, 2005.

FERRAZ, I. L. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2012.

FREITAS, R. **O que é conforto.** In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8; ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 2005, Maceió. Anais... Maceio: COTEDI, p. 726-735, 2005.

FROTA, A.B.; SCHIFFER, S.R. **Manual de Conforto Térmico.** São Paulo: Nobel. p.228, 1988.

GIORDANO, D. E.; KRÜGER, E. **Potencial de redução da temperatura de superfície pelo aumento do albedo nas diversas regiões brasileiras.** XII Encontro Nacional e VIII Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC/ELACAC, Brasília, 2013.

GIVONI, B. **Man, climate and architecture.** 2.ed. London: Applied Science, 1976.

GOODWIN, S; CATANI, M. **The effect of mass on heating and cooling loads and on insulation requirements of buildings in different climates.** ASHRAE Transactions, v.85, n.1, p.869-884, 1979.

GOUVEA, L. V.; OLIVEIRA, A. J.; LEME, F. B. P. **Teto Verde: Uma proposta ecológica e de melhoria do conforto ambiental a partir do uso de coberturas vegetais nas edificações.** Artigo técnico digital, Programa de Pós-graduação em Desing, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

GREEN ROOFS **Research advice note.** Corporation of London. British Council for Offices. Disponível em: << www.greenroofs.com/pdfs/sg-green_roofs_advice_note_corpoflondon.pdf >>. Acessado em 24/5/2016.

GREENROOFS.COM Disponível em <<<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=12> >> , Acessado em 20/5/2016.

GREGORY, W. C.; KRAPOVICKAS, A.; GREGORY, M. P. **Structure, variation, evolution and classification in Arachis.** In: SUMMERFIELD, R. J.; BUNTING, A. H. (Ed.). Advances in legume science. Kew: Royal Botanic Gardens, 1980. p. 469-481.

GRUBBS, F. E. **Procedures for detecting outlying observations in samples.** Taylor & Francis Group, vol 11, p 1-21, 1969.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 2.** São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora, 4a Edição, 1996.

HARTIG, T.; MANG, M.; EVANS, G.W. **Restorative effects of natural environment experience.** Environment and Behavior 23: 3–26, 1991.

HENDERSON, B. **Human-driven extensive greenroof design.** Virginia: Virginia Polytechnic Institute; State University; Master of Landscape Architecture, 2003.

HENEINE, M. C. A. S. **Cobertura Verde**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

HUERTA, A. M. **Sustainable design for a subtropical green roof with local, recyclable substrates and native plants species**. Civil Engineering Monograph, Texas A&M University. 2009.

IAC - INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Boletim Técnico 106**, Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/produtoseservicos/analisedosolo/Boletim_Tecnico_106_rev_atual_2009.pdf>>. Acessado em: 10/12/2015.

IAC - INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Interpretação de resultados de análise de solos**. Disponível em: <<<http://www.iac.sp.gov.br/produtoseservicos/analisedosolo/interpretacaoanalise.php>>>. Acessado em: 10/12/2015.

IAC - INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Solos do Estado de São Paulo – Latossolos**. Disponível em: <<<http://www.iac.sp.gov.br/solospdf/Latossolos.pdf>>>. Acessado em: 10/12/2015.

IGRA a – **International Green Roof Association** Disponível em <<<http://www.igra-world.com/index.php>>>. Acessado em 20/5/2016.

IGRA b – **International Green Roof Association** Disponível em <<http://www.igra-world.com/engineering/pitched_green_roofs.php>>. Acessado em 20/5/2016.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. DE **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. Third Edition. John Wiley & Sons, 1990.

INFOCLIMA – BOLETIM DE INFORMAÇÕES CLIMÁTICAS DO CPTEC/INPE, Ano 22, Número 11, 2015. Disponível em: < <http://infoclima1.cptec.inpe.br/> > Acessado em: 12/01/2016.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Análise Sinótica**. Disponível em: < <http://www.cptec.inpe.br> > Acessado em: 12/01/2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO (IBI). **Impermeabilizações em coberturas verdes**. Revista Técnica, São Paulo, n.152, p. 41, nov.2009.

JOHNSTON, J.; NEWTON, J. **Building green: A guide for using plants on roofs, walls and pavements**. Greater London Authority, London, 2004.

KANE, R. **The Green fuse: using plants to provide ecosystem services**. Silverton: Oregon Garden; Sustainable Plant Research and Outreach, 2004.

KÖHLER, M.; SCHMIDT, M.; LAAR, M. **Roof Gardens in Brazil**. World Climate & Energy Event. Rio de Janeiro, Brasil. p. 455-460, 2003.

KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. Ed.Edgard Blücher. Instituto nacional do livro. MEC, 1973.

- LAWLOR, G. **Green Roofs: A Resource Manual for Municipal Policy Makers**. Canada Mortgage and Housing Corporation. May. p.126, 2006.
- LIU, B.; BASKARAN, B. **Green roof infrastructure – technology demonstration, monitoring and market expansion project**. Part 1: Field monitoring and technical analysis. National Research Council - Institute for Research in Construction. Jun, 2003.
- LIU, K.; BASKARAN, B. **Thermal performance of extensive green roofs in cold climates**. Ottawa, Ontario, National Research Council, Institute for Research in Construction, 2003.
- LOPES, D. A. R. **Análise do comportamento térmico de uma cobertura verde leve (CVL) e diferentes sistemas de cobertura**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- MACHADO, M.; BRITO, C.; NEILA, J. **Comportamiento térmico en modelos con cubiertas ecológicas**. Tecnología y Construcción, Caracas, v.19, n.3, p.49-58, 2003.
- MACIEL, C. A. **Vila Savoye: arquitetura e manifesto**. Vitruvius, Arqtextos, 2002, Disponível em <<<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arqtextos/02.024/785>>>. Acessado em 08/4/2016.
- MAGALHÃES, S.; ALBUQUERQUE, R.R.; PINTO, C.J.; MOREIRA, A.L. **Termorregulação**. Faculdade de Medicina da Universidade do Porto, 2001.
- MARTIN, A. **Green roof manual. How to replace your dead roof with a living landscape**. AmeriCorps community action Project, 2005.
- MILEK, K. B. **Floor formation processes and the interpretation of site activity areas: Na ethnoarchaeological study of turf buildings at Thverá, northeast Iceland**. Journal of Anthropological Archaeology, 31, 119–137, 2012.
- MILLER, A.P.R.R. **Análise do comportamento de substrato para retenção de água pluvial para coberturas verdes extensivas em Curitiba-PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil), universidade Federal do Paraná, 2014.
- MINKE, G. **Techos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos**. Montevideo: Fin de Siglo, 2003.
- MIRANDA, E.M.; JÚNIOR, O.J.S; SILVA, E.M.R. **Amendoim forrageiro: importância, usos e manejo**. Embrapa Agrobiologia: Documentos 259, Seropédica, Rio de Janeiro, 2008.
- MOLINEUX C. J.; FENTIMAN C.H.; GANGE A.C. **Characterising alternative recycledwastematerials for use as green roof growingmedia in the U.K**. Ecol Eng, 35, 1507–13, 2009.
- MONTEIRO, C. A. F. **A frente polar atlântica e as chuvas de inverno na fachada Sul Oriental do Brasil: estudo geográfico sob forma de atlas**. São Paulo: Instituto de Geografia- USP, 1969.
- MONTEIRO, C. A. F. **A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo: estudo geográfico sobre a forma de atlas**. São Paulo: Instituto de Geografia- USP, 1973.

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.

MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. **Heterogeneidade dos pontos experimentais de curvas de retenção de água no solo.** Sci. Agric. Piracicaba 50(3):393-403, out/dez, 1993.

MORAIS, C. S. DE. **Desempenho térmico de coberturas vegetais em edificações na cidade de São Carlos-SP.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal de São Carlos, 2004.

MORAN, A. C. **A North Carolina Field Study to Evaluate Greenroof Runoff Quantity, Runoff Quality, and Plant Growth.** North Carolina State University, 2004

NIACHOU, A.; PAPAKONSTANTINO, K.; SANTAMOURIS, M.; TSANGRASSOULIS, A.; MIHALAKAKOU, G. **Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance.** Energy and Buildings 33, 719-729, 2001.

OBERLANDER, C. H.; WHITELAW, E; MATSUZAKI, E. **Introductory manual for greening roofs for public works and government services Canada.** Public works and government services Canada, 2002.

OBERNDORFER, E.; LUNDHOLM, J.; BASS, B.; COFFMAN, R. R.; DOSHI, H.; DUNNETT, N.; GAFFIN, S.; KÖHLER, M.; LIU, K. K. Y.; ROWE, B. **Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services.** BioScience, 57 (10) p. 823, 2007.

O'CONNOR, P. J. **Perennial Peanut: Gold for Green Roofs in the Humid Tropics.** Scientific Technical Article, UCLA Extension - Student Chapter of the American Society of Landscape Architects, 2010. Disponível em: <<http://www.greenroofs.com/content/guest_features013.htm#top>> Acessado em: 07/5/2016.

OKE, T.R.. **Boundary Layer Climates.** 2nd ed. New York:Methuen. 1987

OLGYAY, V. **Arquitetura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas.** Barcelona: Gustavo Gili, S.A. p.203, 1998.

OLIVEIRA et al. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo.** Campinas: IAC/Embrapa, 1999.

OLIVEIRA, C. C. **Substratos para uso em telhados verdes: Avaliação da retenção hídrica e qualidade da água de escoamento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2012.

ONMURA, S.; MATSUMOTO, M.; HOKOI, S. **Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens.** Energy and Buildings 33: 653-666, 2001.

OSMUNDSON, T. **Roof Gardens: History, Design and Construction.** W.W.Norton & Company, Nova Iorque, 1999.

PAPST, A.L. **Uso de Inércia térmica no clima subtropical. Estudo de caso em Florianópolis-SC.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

PECK, S. W.; CALLAGHAN, C; KUHN, M. E.; BASS, B. **Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada status report on benefits, barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology diffusion.** Canada: Mortgage and Housing, 1999.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. **Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification.** Hydrology and Earth System Sciences. No. 11, p. 1633-1644, 2007.

PIMENTEL DA SILVA, L.; MACRAE, F. R.; GOMES, M. M.; CERQUEIRA, L. F. F.; ROSA, E. U.; MORAES, M. F. **Hidroclimas - Cidades, Qualidade de Vida e Recursos Hídricos: Integração de Recursos Hídricos e Planejamento Urbano para a Região de Baixada do Jacarepaguá, Rio de Janeiro, Brasil.** 11th International Conference on Urban Drainage. Edinburgh, 2008.

PLEDGE, E. **Green Roofs: Ecological Design and Construction.** Philadelphia: Shiffler. 154 p, 2005.

PORSCHKE, U.; KÖHLER, M. **Life cycle costs of green roofs - a comparison of Germany, USA, and Brazil.** In: RIO 3 - WORLD CLIMATE & ENERGY EVENT, Rio de Janeiro. [S.l.:s.n.].p.461-467, 2003.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos.** Salesward-Discovery, Curitiba, 446p., 1996

QUADRO, M. F. de L. **Estudo de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul ZCAS sobre a América do Sul.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE, 1994.

REBOITA, M. S. **Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica.** Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.2, 185 - 204, 2010

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: condicionamento térmico natural.** Porto Alegre: D.C.Luzzatto; Ed.UFRGS, 1985.

SANTOS, W. N. et al. **Método de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 14, n° 5, p. 354-359, 2004.

SANTOS, D. J. P. **Desempenho térmico de uma cobertura verde num edifício solar passivo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente), Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2012.

SEDUM GREEN ROOF – Disponível em: <<http://www.sedumgreenroof.co.uk/S-Pod_Green_Roof_Module.php>>. Acessado em 20/5/2016.

SEIXAS, G. T. C. **Climatologia aplicada à Arquitetura: investigação experimental sobre a distribuição de temperaturas internas em duas células de teste.** 2015. 126p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

- SERRA, R. **Arquitectura y climas**. Barcelona: Gustavo Gili S.A. 94p, 2002.
- STEINKE, E. T. **Climatologia fácil**. São Paulo: Oficina de Textos, 144 p., 2012.
- SUSCA, T., GAFFIN, S. R. e DELL'OSSO, G. R. **Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs**. Environ Pollut. Vol. 159, n.º 8-9, p. 2119-26, 2011.
- SZOKOLAY, S. V. **Green Design**. Budapeste: Kiadó, 1998.
- THEODOSIOU, T. G. **Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique**. Energy and Buildings, v. 35, n. 9, p. 909-917, 2003.
- VALENTIM, J. F., CARNEIRO, J. da C., SALES, M. F. L. **Amendoim forrageiro cv. Belmonte: leguminosa para a diversificação das pastagens e conservação do solo no Acre, Rio Branco**. Embrapa Acre, 18p. (Circular Técnica, 43), 2001.
- VALLS, J. F. M.; SIMPSON, C. E. **Taxonomy, natural distribution, and attributes of Arachis**. In: KERRIDGE, P. C.; HARDY, B., eds., *Biology and Agronomy of Forage Arachis*, Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Chapter 1. p. 1-18, 1994.
- VECCHIA, F. A. S. **Clima e ambiente construído: a abordagem dinâmica aplicada ao conforto humano**. Tese (Doutorado) Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- VECCHIA, F. **Comportamento térmico de sistemas de cobertura**. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada. 01. ed. São Paulo: Eternit. v. 01. 74 p, 2003.
- VECCHIA, F. **Cobertura Verde Leve (CVL): Ensaio Experimental**. In. VI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC) e IV Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído (ELACAC), Maceió, AL, Brasil. p. 2146-2155, 2005.
- VILJOEN, A. **CPULs - Continuous Productive Urban Landscapes. Designing Urban Agriculture for Sustainable Cities**. Oxford, Architectural Press. 2005.
- VUJOVIC, V.; OGUREK, D. J. **Case Study: Green Roof System**. In: School Business Affairs. Issues in education: Boosting budgets by building green - Improving student health - Environment and achievement. v. 71, n. 1, jan, 2005.
- WARK, C. **Cooler Than Cool Roofs: How Heat Doesn't Move Through a Green Roof**. Disponível em: << www.greenroofs.com >>, Abril, 2011. Acessado em 07/5/2016.
- WILLES, J. A.; **Tecnologias em telhados verdes extensivos: meios de cultura, caracterização hidrológica e sustentabilidade do sistema**. Tese (Doutorado em Ciências) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2014.
- WOLLET, T.; KIMMINS, S. **Green Building: a guide to products and their impact on the environment**. Suffolk, Inglaterra. E&F Spon, 2000.

WONG, N.H.; Y. CHEN; C. L. ONG; A. SIA. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. **Building and Environment**. v. 38, n. 2, p. 261-270. 2003.

YOK, T. P.; SIA, A. **A Selection of Plants for Green Roofs in Singapore**. Publication of National Parks Board, Singapore, 2008.

YOUNG, H.D.; FREEDMAN, R.A. **Física II: Termodinâmica e Ondas**. 12ª ed. São Paulo, Addison-Wesley, 2008.

ZINCO **ZinCo GmbH**. Disponível em <<<http://www.zinco-greenroof.com/EN/index.php>>>. Acessado em 20/5/2016.

APÊNDICE A

Valores críticos com significância 0,1 e 0,05 para o cálculo do teste de valores extremos.

n	0,1	0,05
3	1,148	1,153
4	1,425	1,462
5	1,602	1,671
6	1,729	1,822
7	1,828	1,938
8	1,909	2,032
9	1,977	2,11
10	2,036	2,176
11	2,088	2,234
12	2,134	2,285
13	2,176	2,331
14	2,213	2,372
15	2,248	2,409
16	2,279	2,443
17	2,309	2,475
18	2,336	2,504
19	2,361	2,531
20	2,385	2,557
21	2,408	2,58
22	2,429	2,603
23	2,449	2,624
24	2,468	2,644
25	2,486	2,663

26	2,503	2,681
27	2,52	2,698
28	2,536	2,714
29	2,551	2,73
30	2,565	2,745
31	2,579	2,76
32	2,592	2,773
33	2,605	2,787
34	2,618	2,799
35	2,63	2,812
36	2,641	2,824
37	2,652	2,835
38	2,663	2,846
39	2,674	2,857
40	2,684	2,868
50	2,772	2,957
60	2,841	3,027
70	2,898	3,084
80	2,946	3,132
90	2,987	3,173
100	3,024	3,21
110	3,056	3,242
120	3,086	3,271
130	3,112	3,297