

Débora Gracielle Stiegemeier de Liz

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO
TELHADO VERDE EXTENSIVO PARA FLORIANÓPOLIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

**Orientador: Prof. Martin Ordenes
Mizgier, Dr.**

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Liz, Débora Gracielle Stiegemeier de
Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis / Débora Gracielle Stiegemeier de Liz ; orientador, Martin Ordenes Mizgier - Florianópolis, SC, 2016.
113 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Inclui referências

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Telhado verde. 3. Comportamento térmico. 4. Eficiência energética. I. Mizgier, Martin Ordenes. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Débora Gracielle Stiegemeier de Liz

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO
TELHADO VERDE EXTENSIVO PARA FLORIANÓPOLIS**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 01 de julho de 2016.

Prof. Renato Tibiriçá de Saboya, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Banca examinadora:

Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr. - UFSC
Orientador

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, *Ph.D.* - UFSC

Prof. Roberto Lamberts, *Ph.D.* - UFSC

Prof. Saulo Gúths, *Ph.D.* - UFSC

Prof. Eduardo Manuel González Cruz, Dr. - Universidad del Zulia

Ao Rafael, sem você seria impossível.
Aos meus pais, com toda a admiração
por sua sabedoria.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que não me abandonou apesar da minha ausência.

Ao Rafael, com quem compartilho minha história e que, incansavelmente, me motivou.

Aos meus pais, por quem tenho profunda admiração e respeito.

Ao Jônatas, pelo seu exemplo de determinação.

Ao Juliano, pelo seu interesse e incentivo a pesquisa permanente.

As amigas Cai, Fran e Tati pelo otimismo de sempre.

A minha segunda família, Valdete, Antônio, Rúbia e Letícia, que compreenderam minha ausência.

Ao Martin, que me orientou em cada passo e decisão.

Ao Prof. Saulo Gúths, que pacientemente me explicou tantos conceitos importantes para esse trabalho.

Aos professores Carlos Tomelin e Carlos Barbosa, por possibilitarem e incentivarem a realização do mestrado, flexibilizando meus horários de trabalho na UNIVALI.

A Caren que diariamente me ajudou no experimento, permitindo que esse mestrado se concretizasse, e ao Mateus, pela força tantas vezes dedicada. Obrigada por compartilhar as alegrias e incertezas.

A equipe do Laboratório de Conforto Ambiental, pelo empréstimo da câmera termográfica e do *nobreak*.

A equipe do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas, com quem adquiri conhecimento e experiência.

A equipe do Laboratório de Ciências Térmicas, por auxiliar no processo de secagem da terra.

A equipe do Núcleo de Medição do Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações por compartilhar da Unidade de aquisição e registro de dados.

A equipe do Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia, por autorizar o acesso a cobertura do bloco B do Departamento de Engenharia Mecânica e por disponibilizar acesso a base de dados climáticos.

"É proibido chorar sem aprender,
Levantar-se um dia sem saber o que fazer
Ter medo de suas lembranças.
[...] É proibido não criar sua história,
Deixar de dar graças a Deus por sua vida,
Não ter um momento para quem necessita de
você,
Não compreender que o que a vida te dá,
também te tira."

(Pablo Neruda)

RESUMO

O desempenho térmico de uma edificação está diretamente relacionado aos materiais que compõem sua envoltória, pois é a área que limita o ambiente interno e externo, sendo o meio por onde ocorrem as trocas de calor entre eles. Nos países tropicais, a cobertura das edificações influencia fortemente na transferência de calor aos ambientes internos, pois é a área mais exposta à radiação solar direta. O telhado verde é uma técnica conhecida desde as antigas civilizações. Seu uso pode trazer benefícios como a redução no consumo energético das edificações, redução do efeito ilha de calor urbano, gestão de águas pluviais, entre outros. As Certificações Ambientais, vigentes atualmente no Brasil, incentivam o uso da cobertura vegetal nas edificações por meio de pontuações e bonificações. Adicionalmente, municípios de diferentes regiões do Brasil têm sancionado leis referente a telhados verdes em projetos de novas edificações. Assim, este experimento teve como finalidade identificar elementos que compõem o sistema telhado verde e que são capazes de contribuir no processo de transferência de calor através da cobertura. O ensaio foi realizado na cidade de Florianópolis - SC. A bancada experimental sobre a qual foram desenvolvidos os ensaios consiste em uma câmara fechada e isolada termicamente, para reduzir as trocas térmicas entre o interior e o exterior. A temperatura do ar no interior do aparato foi mantida constante artificialmente, a fim de analisar a influência das condicionantes externas. Sobre a bancada foram instaladas lajes de concreto que serviram de base para as diferentes configurações de coberturas verdes analisadas, que incluíram variação do teor de umidade e espessura do substrato, variação da camada vegetal e isolamento térmico. Para todas as medições foram registrados dados de temperatura e fluxo de calor superficiais. A calibração dos sensores e testes iniciais na bancada garantiram a confiabilidade para os ensaios propostos. Os resultados indicam que a variação da espessura do substrato e da camada vegetal apresentam os dados mais significativos na redução do ganho de calor. A variação do teor de umidade apresentou resultados interessantes na análise de temperatura. Apesar da temperatura média no substrato úmido ser 8,63°C menor do que no substrato seco, a diferença entre as temperaturas médias registradas na laje de concreto foi de apenas 0,79°C. A umidade relativa do ar foi relevante para as amostras com vegetação, trazendo benefício quanto mais seco fosse o ar. Sem a camada vegetal, os resultados acompanharam as variações da temperatura do ar externo. A presença de vegetação e a maior espessura de substrato resultaram em um atraso térmico de 5,95 e 4,77h, respectivamente. O amortecimento térmico para os mesmos casos foi de 42% e 43%.

Palavras-chave: telhado verde, comportamento térmico, eficiência energética.

ABSTRACT

The thermal performance of a building is directly related to the materials that make up its envelope as it is the area that limits the internal and external environment, and the means by which occur heat exchange between them. In tropical countries, the coverage of buildings strongly influences the transfer of heat to internal environments, it is the most exposed area to direct sunlight. The green roof is a technique known since ancient civilizations. Its use can bring benefits such as reducing the energy consumption of buildings, reducing the urban heat island effect, storm water management, among others. The Environmental Certifications currently in force in Brazil, encouraging the use of vegetation cover in buildings through scores and bonuses. In addition, municipalities in different regions of Brazil have sanctioned laws relating to green roofs on new buildings projects. Thus, this experiment aimed to identify elements that make up the green roof system and are able to contribute in the heat transfer process through the cover. The test was conducted in the city of Florianópolis - SC. The test rig on which tests have been developed consisting of a closed thermally insulated chamber, to reduce heat exchanges between the inside and the outside. The air temperature inside the apparatus is artificially maintained constant in order to analyze the influence of external factors. On the bench were installed concrete slabs that formed the basis for the various combinations of green roofs analyzed, which included variation of moisture content and thickness of the substrate, the plant layer variation and thermal insulation. For all measurements were recorded temperature data and surface heat flux. The calibration of sensors and initial tests on the bench ensure reliability for the proposed testing. The results indicate that variation in substrate thickness and vegetal layer have the most significant data in reducing heat gain. The variation of moisture content presents interesting results in temperature analysis. Although the average temperature in moist substrate be 8,63°C lower than in the dry substrate, the difference between the average temperatures recorded in the concrete slab was only 0,79°C. The relative humidity was relevant to the samples with vegetation, bringing the drier would benefit the air. No vegetable layer, the results followed the changes in the outside air temperature. The presence of vegetation and higher substrate thickness resulted in a thermal delay 5.95 and 4,77h, respectively. The thermal buffer for the same cases were 42% and 43%.

Keywords: green roof, thermal behavior, energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Radiação solar global horizontal média anual no Brasil | 23 |
| Figura 2 - Jardins Suspensos da Babilônia, de Martin Heemskerck, séc. XVI..... | 25 |
| Figura 3 - Composição básica do telhado verde | 25 |
| Figura 4 - Composição telhado verde..... | 29 |
| Figura 5 - Exemplos de plantas utilizadas nos sistemas de cobertura vegetal: <i>sedum spurium</i> - suculenta (a); <i>carex flacca</i> - graminea (b); <i>lantana camara</i> - arbusto (c) | 30 |
| Figura 6 – Esquema do balanço energético do telhado verde | 31 |
| Figura 7 - Configuração experimental do telhado verde (a) e representação esquemática do aparato experimental (b) | 32 |
| Figura 8 - Perfil dos fluxos de calor através das coberturas (01 a 07/03/2008) | 33 |
| Figura 9 - Localização das estações de monitoramento na cobertura da Estação de Trem Tai Po..... | 35 |
| Figura 10 - Aparato experimental para medições em laboratório para telhado verde | 35 |
| Figura 11 - Plataformas experimentais (a) e tipos de vegetação adotados (b) tundra e (c) pampa | 36 |
| Figura 12 - Corte esquemático da instalação experimental, mostrando as camadas de telhado verde e a organização vertical dos sensores de monitoramento ambiental | 37 |
| Figura 13 - Módulo de controle e módulo experimental (a) e esquema do módulo experimental (b)..... | 37 |
| Figura 14 - Projeto da bancada experimental..... | 38 |
| Figura 15 - Representação conceitual da copa da planta onde IAF = 1 (a) ou IAF = 3 (b) | 41 |
| Figura 16 - Sensores de dados climáticos: radiômetro (a), piranômetro (b), pirgeômetro (c), anemômetro (d)..... | 42 |
| Figura 17 – Termistor Omega 44033 (a), sensor de umidade do solo Onset Hobo S-SMC (b), sensor de fluxo de calor HFP01SC of Hukseflux (c) | 43 |
| Figura 18 - Sensores diferenciados: termômetro infravermelho Apogee (a), espectrorradiômetro ASD Inc. FieldSpec (b), lisímetro Sartorius IS 300 IGG-H platform (c)..... | 44 |
| Figura 19 - Carta Bioclimática da NBR 15.220-3 adaptada de Givoni (a) e normais climatológicas para a Zona Bioclimática 3 (b)..... | 46 |
| Figura 20 - Carta Psicrométrica para Florianópolis pelo <i>Climate Consultant</i> | 46 |
| Figura 21 - Carta de temperatura para Florianópolis pelo <i>Climate Consultant</i> | 47 |
| Figura 22 - Casa Eficiente (a) e composição do telhado verde instalado (b) | 49 |
| Figura 23 - Fluxo de calor através da cobertura para dias ensolarados nas quatro estações..... | 51 |

| | |
|---|-----|
| Figura 24 - Local de implantação da bancada experimental na cobertura do bloco B do Departamento da Engenharia Mecânica..... | 53 |
| Figura 25 - Planta baixa bancada experimental..... | 55 |
| Figura 26 - Corte esquemático AA da bancada experimental..... | 56 |
| Figura 27 - Sequência de montagem da bancada experimental (lado móvel) | 56 |
| Figura 28 - Exterior (a) e interior (b) da bancada experimental | 57 |
| Figura 29 - Equipamento para medição da temperatura externa local | 57 |
| Figura 30 - Instrumentação e composição do telhado verde (a) e da cobertura de referência (b) | 58 |
| Figura 31 - Sensores instalados na superfície superior da plataforma de concreto..... | 59 |
| Figura 32 - Representação esquemática das aplicações na superfície inferior da plataforma de concreto | 59 |
| Figura 33 - Termopar tipo T utilizado na pesquisa..... | 60 |
| Figura 34: Princípio de funcionamento de um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial | 61 |
| Figura 35: Transdutor de fluxo de calor revestido por alumínio | 61 |
| Figura 36 - Sistema da junta de referência | 62 |
| Figura 37 - Etapas de execução da junta de referência | 63 |
| Figura 38 - Termistor NTC-30K (a) e módulo de controle (b) | 63 |
| Figura 39 - Lado fixo da bancada | 64 |
| Figura 40 - Identificação das plataformas de concreto sobre a bancada experimental | 65 |
| Figura 41 - Camadas comuns a todas as etapas de medição | 66 |
| Figura 42 - Substrato seco e úmido (a), estufa para secagem da terra (b); e processo de saturação da terra | 66 |
| Figura 43 - Substrato com espessura de 5 cm e 15 cm | 67 |
| Figura 44 - Substrato com 10cm de espessura (a) com e sem vegetação (b) | 68 |
| Figura 45 - Substratos com vegetação diferente (a) e detalhe (b) – grama Sempre Verde (esquerda) e grama Preta (direita)..... | 68 |
| Figura 46 - Isolamento térmico XPS sob impermeabilização e camada drenante (a); substrato úmido (b); grama Sempre Verde (c) | 68 |
| Figura 47 - Parâmetros atraso térmico e fator decremental..... | 69 |
| Figura 48 – Termografia (a) e foto (b) telhado verde com grama Sempre Verde e grama Preta | 86 |
| Figura 49 - Sistema de calibração com transdutor auxiliar | 107 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----|
| Gráfico 1 - Fluxo de calor na superfície de contato superior do componente estrutural e precipitação - substrato seco e úmido | 75 |
| Gráfico 2 - Temperatura na superfície de contato superior do componente estrutural, na superfície do substrato de terra e no dossel das plantas - substrato seco e úmido | 76 |
| Gráfico 3 - Radiação solar e temperatura do ar externo - substrato seco e úmido..... | 76 |
| Gráfico 4- Fluxo de calor na superfície de contato superior do componente estrutural e precipitação - substrato 5 e 15cm de espessura | 78 |
| Gráfico 5 - Temperatura na superfície de contato superior do componente estrutural e na superfície do substrato de terra - substrato 5 e 15cm de espessura..... | 79 |
| Gráfico 6 - Radiação solar e temperatura do ar externo - substrato 5 e 15cm de espessura..... | 79 |
| Gráfico 7 - Fluxo de calor na superfície de contato superior do componente estrutural e precipitação - substrato com e sem vegetação | 81 |
| Gráfico 8 - Temperatura na superfície de contato superior do componente estrutural e na superfície do substrato de terra - substrato com e sem vegetação..... | 82 |
| Gráfico 9 - Radiação solar e temperatura do ar externo - substrato com e sem vegetação | 83 |
| Gráfico 10 - Fluxo de calor na superfície de contato superior do componente estrutural e precipitação - substrato com vegetação de tipos diferente..... | 84 |
| Gráfico 11 - Temperatura na superfície de contato superior do componente estrutural, na superfície do substrato de terra e no dossel das plantas - substrato com vegetação de tipos diferente..... | 86 |
| Gráfico 12 - Radiação solar e temperatura do ar externo - substrato com vegetação de tipos diferente..... | 87 |
| Gráfico 13 - Fluxo de calor na superfície de contato superior do componente estrutural e precipitação - telhado verde com e sem isolamento térmico... | 88 |
| Gráfico 14 - Temperatura na superfície de contato superior do componente estrutural, na superfície do substrato de terra e no dossel das plantas - telhado verde com e sem isolamento térmico | 89 |
| Gráfico 15 - Radiação solar e temperatura do ar externo - substrato com vegetação de tipos diferente..... | 90 |
| Gráfico 16 - Parâmetro fator decremental para cada etapa de medição | 92 |
| Gráfico 17 – Parâmetro atraso térmico para cada etapa de medição | 93 |
| Gráfico 18 - Resistência térmica para as amostras de telhado verde com e sem isolamento térmico e cobertura com telha de fibrocimento..... | 95 |
| Gráfico 19: Temperatura da câmara termicamente controlada com $P = Kcr$, dia 30/07/2015..... | 110 |
| Gráfico 20: Temperaturas das juntas de referência..... | 111 |
| Gráfico 21 - Fluxo de calor registrado na superfície de contato superior do componente estrutural com as plataformas expostas durante 24 horas ... | 112 |

Gráfico 22 - Temperatura registrada na superfície de contato superior do componente estrutural com as plataformas expostas durante 24 horas e temperatura do ar interno113

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Estratégias bioclimáticas para Florianópolis pelo <i>Climate Consultant</i> | 47 |
| Tabela 2 - Parâmetros de desempenho térmico para cobertura segundo normas, regulamentos e certificações brasileiros | 48 |
| Tabela 3 - Etapas de medição com telhado verde | 65 |
| Tabela 4 - Dados climáticos e dados medidos (temperatura e fluxo de calor superficiais) em todas as etapas de medição..... | 73 |
| Tabela 5 - Correlações entre parâmetros fator decremental (f) e atraso térmico (φ) para avaliação do comportamento térmico do telhado verde ... | 91 |
| Tabela 6 - Valores calculados para resistência térmica (R_T) e transmitância térmica (U) das três amostras | 93 |
| Tabela 7 - Nível de classificação de desempenho alcançado pelas amostras, de acordo com normas, regulamentos e certificações brasileiros | 94 |
| Tabela 8 - Resultados da calibração dos transdutores..... | 108 |
| Tabela 9: Valores de PID para o método de Ziegler-Nichols..... | 110 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| LISTA DE FIGURAS..... | 15 |
| LISTA DE GRÁFICOS..... | 17 |
| LISTA DE TABELAS..... | 19 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 23 |
| 1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA..... | 23 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 27 |
| 1.2.1. Objetivo Geral..... | 27 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos..... | 28 |
| 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 28 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 29 |
| 2.1. COMPOSIÇÃO ESTRUTURAL DO TELHADO VERDE..... | 29 |
| 2.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM TELHADOS VERDES..... | 31 |
| 2.3. FUNDAMENTOS PARA PESQUISA EXPERIMENTAL COM TELHADO VERDE..... | 34 |
| 2.3.1. Experimentos de campo ou de laboratório..... | 34 |
| 2.3.2. Variáveis e parâmetros de estudos com telhado verde..... | 38 |
| 2.3.3. Instrumentação genérica recomendada..... | 42 |
| 2.4. TELHADO VERDE COMO ESTRATÉGIA BIOCLIMÁTICA PARA FLORIANÓPOLIS..... | 45 |
| 2.4.1. Estratégias para condicionamento térmico..... | 45 |
| 2.4.2. Parâmetros construtivos..... | 48 |
| 2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 51 |
| 3. MÉTODOS, FERRAMENTAS E TÉCNICAS..... | 53 |
| 3.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL COM TELHADO VERDE..... | 53 |
| 3.1.1. Bancada experimental para medições em telhado verde..... | 53 |
| 3.1.2. Dados climáticos..... | 57 |
| 3.1.3. Instrumentação e variáveis analisadas..... | 58 |
| 3.1.3.1. Termopar tipo T..... | 60 |
| 3.1.3.2. Transdutor de fluxo de calor..... | 60 |
| 3.1.4. Junta de referência..... | 61 |
| 3.1.5. Controle da temperatura interna através do controlador PID..... | 63 |

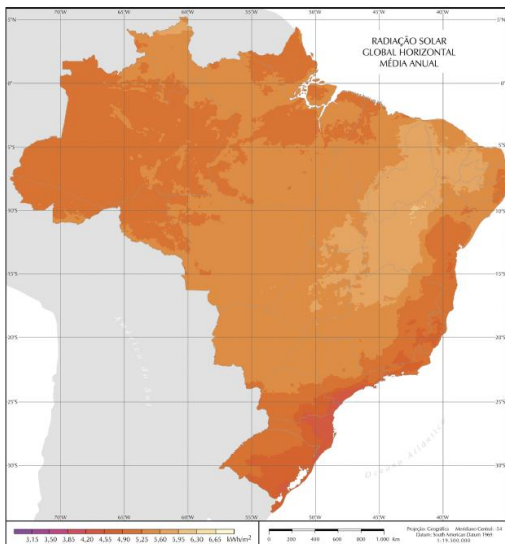
| | | |
|----------|--|-----|
| 3.1.6. | Composições estruturais do telhado verde | 64 |
| 3.1.6.1. | Etapa 01: variável umidade | 66 |
| 3.1.6.2. | Etapa 02: variável espessura | 67 |
| 3.1.6.3. | Etapas 03 e 04: variável vegetação e tipo de vegetação 67 | |
| 3.1.6.4. | Etapa 05: variável isolamento térmico | 68 |
| 3.2. | PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO TÉRMICO: FATOR DECREMENTAL, ATRASO TÉRMICO E RESISTÊNCIA TÉRMICA EM DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE TELHADO VERDE..... | 69 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 73 |
| 4.1. | ETAPA 01: VARIÁVEL UMIDADE..... | 74 |
| 4.2. | ETAPA 02: VARIÁVEL ESPESSURA | 77 |
| 4.3. | ETAPA 03: VARIÁVEL VEGETAÇÃO | 80 |
| 4.4. | ETAPA 04: VARIÁVEL TIPO DE VEGETAÇÃO..... | 83 |
| 4.5. | ETAPA 05: VARIÁVEL ISOLAMENTO TÉRMICO | 87 |
| 5. | CONCLUSÕES | 97 |
| 5.1. | LIMITAÇÕES DO TRABALHO | 99 |
| 5.2. | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 99 |
| | REFERÊNCIAS | 101 |
| | APÊNDICES | 107 |
| | APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE FLUXO DE CALOR (FLUXÍMETRO)..... | 107 |
| | APÊNDICE C – MEDIÇÃO DE VALIDAÇÃO COM AS PLATAFORMAS DE CONCRETO EXPOSTAS..... | 112 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

O desempenho térmico de uma edificação está diretamente relacionado aos materiais que compõem sua envoltória, pois é a área que limita o ambiente interno e externo, sendo o meio por onde ocorrem as trocas de calor entre eles. Nos países tropicais, a cobertura das edificações influencia fortemente a transferência de calor aos ambientes, pois é a área mais exposta à radiação solar direta. Apesar da diversidade climática observada no Brasil, grande parte do território apresenta médias de irradiação global elevadas. Na Figura 1 pode-se observar que a média anual do total diário de irradiação global incidente apresenta boa uniformidade em todo o país, com valor máximo (6,5 kWh/m²) ocorrendo no norte do estado da Bahia e valor mínimo (4,25 kWh/m²) ocorrendo no litoral norte de Santa Catarina (PEREIRA, E. B. et al. 2006). Assim, o sistema construtivo adotado e os materiais utilizados na execução da cobertura de uma edificação, respondem por grande parte da eficiência e desempenho térmico da mesma.

Figura 1 - Radiação solar global horizontal média anual no Brasil



Fonte: Pereira et al., 2006

Segundo John e Savastano Junior (2014), cerca da metade da área de telhados construídos no Brasil corresponde a telhas onduladas de

fibrocimento (um mercado de aproximadamente 250 milhões de metros quadrados de telhas por ano). A transmitância térmica de uma cobertura com telha de fibrocimento de 6 mm de espessura sobre laje maciça de concreto com 10 cm de espessura, considerando fluxo de calor descendente, é igual a 2,06 W/m²K (INMETRO, 2013), ou seja, maior do que a recomendada pela ABNT NBR 15.220-3 (2005b) para a Zona Bioclimática 3 (a qual pertence a cidade de Florianópolis). A norma recomenda valores inferiores a 2 W/m²K (cobertura leve isolada).

Diversas pesquisas no Brasil (IKEMATSU, 2007, MICHELS; LAMBERTS; GÜTHS, 2008a, DORNELLES, 2008, PEREIRA, 2014) vem sendo realizadas a fim de investigar as propriedades termofísicas responsáveis pela redução dos ganhos térmicos e, conseqüentemente, das cargas térmicas da edificação. Michels, Lamberts e Güths (2008a) analisaram a influência das barreiras radiantes térmicas, da cor e da porosidade das telhas no fluxo de calor pelo telhado. Os resultados apontaram que telhas cerâmicas porosas e telhas brancas são capazes de reduzir os ganhos de calor pela cobertura, bem como o uso de barreiras radiantes podem reduzir o fluxo de calor que atinge o teto da edificação.

O telhado verde é uma técnica milenar que apresenta diversos benefícios. Seu uso vem desde as antigas civilizações, podendo ser observado em diversas arquiteturas vernaculares como o Zigurate de Nanna e os famosos Jardins Suspensos da Babilônia (Figura 2), construídos no reinado de Nabucodonosor (BEZERRA, 2015). Porém, foi nos anos 70 que seu uso foi difundido, quando muitos livros e artigos sobre coberturas verdes foram publicados na Alemanha.

No meio universitário, pesquisadores como Hans Luz, professor e arquiteto paisagista de grande influência, em 1970 propuseram a incorporação das coberturas verdes à estratégia da melhora da qualidade do ambiente urbano no artigo "Roofgreening: luxury or necessity?". Em 1971, Gerda Gollwitzer e Werner Wirsing, arquitetos paisagistas alemães publicam "Roof Areas Inhabited, Viable, and Covered by Vegetation", uma investigação pioneira sobre as modernas coberturas verdes. No ano seguinte, o Professor Hans-Joachim Liesecke descreveu as bases das coberturas verdes intensivas no seu relatório Dach und Terrassengärten - Roof and Terrace Gardens.

(NASCIMENTO; FREITAS; SCHMID, 2008, p. 5).

Figura 2 - Jardins Suspensos da Babilônia, de Martin Heemskerck, séc. XVI.



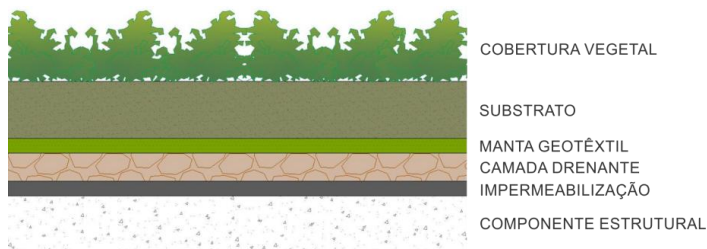
Fonte: Bezerra, 2015

Entre os benefícios do uso da cobertura verde destacam-se a redução no consumo energético das edificações (SANTAMOURIS; 2007; SPALA; 2008), redução do efeito ilha de calor urbano (TAKEBAYASHI; MORIYAMA, 2007) e gestão de águas pluviais (NARDINI; ANDRI; CRASSO, 2012).

Apesar de inúmeros benefícios, o uso de coberturas verdes apresenta limitações. Aproul et al (2014), através de uma análise econômica de ciclo de vida de 50 anos entre os telhados preto, branco e verde, apresentam o telhado verde como o menos rentável e o principal fator para esse resultado é o alto custo de instalação do sistema. Entretanto, fatores ambientais e estéticos não foram considerados, como por exemplo, mitigação da ilha de calor, biodiversidade, qualidade do ar, sequestro de carbono e aumento do valor da propriedade.

O sistema telhado verde é caracterizado pelo uso de substrato e vegetação sobre a cobertura da edificação. A composição básica compreende o componente estrutural, camada impermeabilizante, camada drenante, manta geotêxtil, substrato e cobertura vegetal (Figura 3).

Figura 3 - Composição básica do telhado verde



Fonte: Adaptado de Miranda, 2015

A seleção das plantas escolhidas para o telhado verde depende de fatores como a altura final desejada, período de floração e o tipo de solo (SPALA et al., 2008). A manutenção das plantas e o sistema de irrigação também são fatores importantes considerando a tecnologia de telhados verdes.

Na literatura são definidos dois tipos de telhados verdes que se diferenciam pela complexidade. As 'coberturas verdes extensivas' são mais simples e resistentes, com menor espessura de substrato (5 a 15 cm), vegetação rasteira e baixa manutenção. Já as 'coberturas verdes intensivas' apresentam uma camada mais espessa de substrato (20 a 60 cm), que sustentam plantas de maior porte, requerendo manutenção periódica e sistemas de irrigação (PARIZOTTO FILHO, 2010; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2012).

No Brasil não existe norma ou regulamento que estabeleça parâmetros mínimos para projeto e execução de telhados verdes. A norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005b) estabelece um Zoneamento Bioclimático Brasileiro abrangendo um conjunto de recomendações e estratégias construtivas destinadas às habitações unifamiliares de interesse social. Para cada uma das Zonas Bioclimáticas são apresentadas diretrizes construtivas para as vedações externas. A NBR 15575-5 (ABNT, 2013) estabelece os requisitos e critérios de desempenho exigidos dos sistemas de coberturas para edificações habitacionais em cada Zona Bioclimática. O critério para desempenho térmico é a transmitância térmica.

Por outro lado, as Certificações Ambientais, vigentes atualmente no Brasil, incentivam o uso da cobertura vegetal nas edificações por meio de pontuações e bonificações. Isso se dá pelo fato de o sistema permitir pontuações em várias categorias simultaneamente. O Processo AQUA-HQE pontua a utilização de telhado verde na Categoria Gestão da energia, como exemplo de elemento passivo que limita a necessidade de resfriamento; na Categoria Gestão da água o telhado verde é considerado uma solução para reduzir áreas impermeáveis e reter águas pluviais; e na Categoria Relação do edifício com o seu entorno, o sistema é citado como exemplo de medida para melhoria da qualidade ecológica do local do empreendimento e da biodiversidade (FCAV, 2007). A Certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) concede pontuações nos créditos Redução da ilha de calor, Desenvolvimento do espaço (proteção e restauração do habitat e maximização dos espaços abertos), Projeto para águas pluviais (controle da qualidade e controle da quantidade), Redução no uso da água, Otimização da performance energética e Uso eficiente de água no paisagismo. Nesse, a pontuação é possível caso o tipo de vegetação adotada seja nativa ou adaptada (USGBC, 2009). Assim, pode-se observar que o sistema telhado verde, como uma única estratégia de projeto, contribui na obtenção de vários pontos simultaneamente.

Vários municípios em diferentes regiões do país têm sancionado leis referentes a telhados verdes em projetos de novas edificações. Na cidade do Recife - PE as edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não habitacionais com mais de 400 m² de cobertura

devem prever a instalação de telhado verde para sua aprovação (Lei nº 18.112, de 12 de janeiro de 2015). De semelhante modo, o município de Itu - SP obriga a instalação de telhados verdes em edificações residenciais ou não, com mais de três pavimentos (Lei nº 1.579, de 22 de novembro de 2013). O município de Canoas - RS prevê a instalação de telhado verde em edificações residenciais, comerciais ou públicas a fim de compensar parcialmente a construção sobre Área Livre Obrigatória mínima necessária para o terreno (Lei nº 5.840, de 27 de maio de 2014). Goiânia - GO, ao instituir o programa IPTU Verde, incentiva o uso de telhados verdes em todas as coberturas disponíveis na edificação concedendo 3% de desconto no Imposto Predial e Territorial Urbano (Lei Complementar nº 235, de 28 de dezembro de 2012).

Tornar obrigatória a instalação de telhados verdes nas novas construções inibe o desenvolvimento de outras tecnologias. A obrigatoriedade de uma determinada estratégia pode representar uma barreira ao avanço técnico-científico das demais. Considerando a diversidade bioclimática brasileira, é fundamental o incentivo a pesquisas de sistemas construtivos diversificados.

Segundo Carter e Fowler (2008), as políticas de telhados verdes deveriam abranger regulamentações, incentivos financeiros e financiamento de projetos demonstrativos ou de investigação. Um estudo realizado por Zhang et al. (2012) em edifícios existentes em Hong Kong revela as três principais barreiras para a implementação de telhados verdes extensivos: falta de promoção das comunidades governamentais e sociais entre os setores público e privado; falta de incentivo do governo para com os proprietários dos edifícios existentes e aumento do custo de manutenção (ZHANG, X. et al., 2012).

Para Lehmann (2014) o desenvolvimento urbano integrado com foco em energia, água, vegetação e microclima urbano terá que assumir um papel de liderança e os urbanistas terão que se envolver com os gestores políticos a fim de reduzir o consumo de energia e otimizar os recursos dos municípios.

A partir dos fatos mencionados até o momento, faz-se necessário investigar os comportamentos termofísicos que envolvem o sistema telhado vegetado, a fim de contribuir com a produção de conhecimento científico como suporte para o avanço das discussões que envolvem a tecnologia em questão.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Analisar, experimentalmente, o comportamento térmico do telhado verde a partir de uma comparação com amostras que representam diferentes composições construtivas de coberturas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Definir os procedimentos e parâmetros para viabilizar a construção de uma bancada experimental para comparação entre telhados verdes de diferentes composições estruturais;
- b) Avaliar comparativamente o comportamento térmico de telhados verdes com diferentes composições estruturais;
- c) Avaliar comparativamente o comportamento térmico de telhados verdes com e sem acréscimo de isolante térmico.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A redação deste projeto de dissertação está apresentada em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre o assunto, abordando aspectos históricos, benefícios e desafios encontrados a partir do uso do telhado verde, sua composição básica e tipos de sistemas. Relata também barreiras e incentivos encontrados no Brasil a partir de políticas públicas, regulamentos e certificações. Após identificado o problema, são descritos os objetivos geral e específicos do tema em estudo.

No segundo capítulo é apresentada a fundamentação teórica para o desenvolvimento do trabalho, onde os principais conceitos que envolvem a abrangência dessa pesquisa são tratados a partir de outros estudos encontradas na literatura científica. Os elementos que compõem a cobertura vegetal e sua importância são apresentados, bem como o processo de transferência de calor nesse sistema. Ainda nesse capítulo são analisados estudos experimentais cujo objeto é o telhado verde e é abordada uma análise sobre seu potencial como estratégia bioclimática.

O terceiro capítulo trata da metodologia adotada para atingir os objetivos propostos. Com base na revisão de literatura, são estabelecidos os procedimentos e apresentadas as etapas para construção da bancada experimental. As variáveis analisadas, os instrumentos utilizados e as etapas de medição são apresentadas em seguida. Por fim são descritos os parâmetros de avaliação do comportamento térmico da cobertura vegetal.

O quarto capítulo apresenta os resultados alcançados a partir da análise de cada etapa de medição com diferentes configurações nas camadas que compõe o sistema telhado verde. Os dados registrados para temperaturas superficiais e fluxo de calor são comparados entre duas plataformas que sustentam as amostras de telhados verdes, e confrontados com as condições climáticas, na busca de se identificar de que forma uma característica diferente pode variar os resultados. Após essa análise, o quinto capítulo apresenta as principais conclusões do trabalho, com resultados de maior relevância.

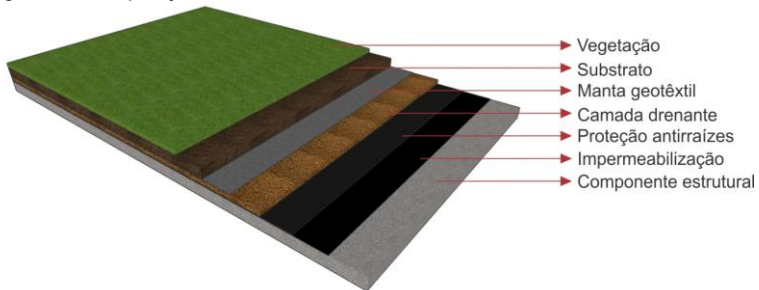
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O sistema de cobertura denominado telhado verde tem como elemento principal a vegetação. Sua presença torna o sistema dinâmico e, conseqüentemente, complexo. Este capítulo aborda as questões que dão suporte ao desenvolvimento dessa pesquisa. Apresenta a composição estrutural do sistema telhado verde, os processos de transferência de calor, alguns experimentos realizados com telhados verdes e, por fim, referencia as normas, regulamentos e certificações brasileiros que estabelecem parâmetros mínimos para as coberturas.

2.1. COMPOSIÇÃO ESTRUTURAL DO TELHADO VERDE

A composição básica do sistema telhado verde compreende, do topo à base: vegetação, substrato, manta geotêxtil, camada de drenagem, barreira antirraízes e camada de impermeabilização (Figura 4). A vegetação utilizada deve ser resistente, pois é a camada mais exposta as variações climáticas, suportando a radiação solar direta, eventos de chuva intensa e ventos predominantes.

Figura 4 - Composição telhado verde



Fonte: elaborado pelo autor

As plantas mais utilizadas são as suculentas, as gramíneas e os arbustos (Figura 5). Entretanto, as suculentas, por sua capacidade de resistir a períodos de seca, também perdem menos água no processo da evapotranspiração. A seleção do tipo de planta deve considerar as condições climáticas e o impacto no ecossistema. Plantas nativas requerem menor manutenção (PARIZOTTO FILHO, 2010; TABARES-VELASCO, P. C. SREBRIC, J., 2012; LUCKETT, K., 2009; BERARDI; GHAFFARIANHOSEINI; GHAFFARIANHOSEINI, 2014).

Figura 5 - Exemplos de plantas utilizadas nos sistemas de cobertura vegetal: *sedum spurium* - suculenta (a); *carex flacca* - gramínea (b); *lantana camara* - arbusto (c)



Fonte: Emory Knoll Farms¹ (a) (b); Government of Western Australia² (c)

A camada de substrato pode ser constituída de solo (areia, argila, terra preta), resíduos agrícolas (palhas, cascas, etc.) e materiais reciclados (tijolo moído, serragem, etc.). Sua função é dar suporte as plantas, assegurando seu crescimento e fornecendo os nutrientes necessários. A espessura da camada de substrato para sistemas extensivos varia de 5 a 15 cm. A porosidade é uma característica que possibilita a drenagem da água, evitando o afogamento das raízes. A literatura recomenda que, no caso de substratos compostos por solos, a composição deve ser de 75 - 80% de solo mineral e 20 - 25% de solo orgânico (PARIZOTTO FILHO, 2010; LUCKETT, K., 2009).

A manta geotêxtil tem por função separar o substrato da camada drenante, evitando o lixiviamento de partículas que podem entupir o sistema. A camada drenante, por sua vez, armazena água nos períodos secos e auxilia no seu escoamento quando o substrato está saturado, nos períodos de chuva intensa. Podem ser utilizados agregados graúdos, espumas absorventes ou placas industrializadas com recipientes de formatos variados que armazenam a água. O excesso é conduzido aos drenos, ralos ou calhas coletoras. A barreira antirraízes protege o componente estrutural de possíveis danos causados pelas raízes. Pode ser composto por polietileno de alta densidade (PARIZOTTO FILHO, 2010; TABARES-VELASCO, P. C. SREBRIC, J., 2012; LUCKETT, K., 2009).

A camada impermeabilizante tem por finalidade proteger o componente estrutural, devendo ser afixada no mesmo de maneira segura. Antes da aplicação das demais camadas é necessário realizar um teste de estanqueidade para assegurar a durabilidade do sistema telhado verde (PARIZOTTO FILHO, 2010; LUCKETT, K., 2009).

¹ Disponível em: <<http://www.greenroofplants.com/catalog/>>. Acesso em: 26 mai. 2016.

² Disponível em: <<https://www.agric.wa.gov.au/herbicides/lantana-control>>. Acesso em: 26 mai. 2016

2.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM TELHADOS VERDES

O processo de transferência de calor ocorre sempre que existir diferença de temperatura entre um meio ou entre meios diferentes. O fluxo de calor, então, é definido como a taxa de energia térmica transferida por unidade de tempo devido a uma diferença de temperatura (INCROPERA et al, 2008).

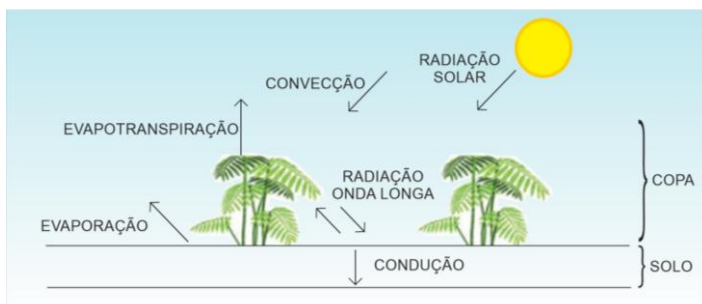
O processo de transferência de calor em um telhado verde é significativamente diferente do que em um telhado tradicional, não só pela mudança nas características térmicas dos materiais e nas propriedades das superfícies, mas também pelos processos metabólicos das plantas (JIM; HE, 2010).

Em materiais com elevada porosidade, como o substrato de telhados verdes, o fenômeno de transferência de umidade tem um impacto significativo (OULDBOUKHITINE et al., 2011). O solo é um meio poroso, no qual três fases podem ser distinguidas: a matriz sólida (minerais e materiais orgânicos), a fase líquida (a água) e o gasoso (ar e vapor de água). Os mecanismos de troca de calor são: condução em sólidos e líquidos; convecção nos meios gasoso e líquido; e transferência de calor latente por difusão de vapor em poros (DEL BARRIO, 1998).

Na camada de vegetação, os processos de trocas de calor são: radiação solar absorvida pelas folhas; trocas radiativas entre as folhas, entre folhas e céu, entre folhas e solo; transferência de calor por convecção entre as folhas e o ar dossel e entre o solo e o ar dossel; evapotranspiração nas folhas; evaporação/condensação de vapor de água na superfície do solo; transferência de calor e vapor convectivo entre o ar dentro do dossel e o ar livre (DEL BARRIO, 1998).

O balanço energético do telhado verde é, portanto, resultado dos fluxos de calor sensível (convecção e radiação) e latente (evaporação) da superfície do solo e da planta, combinados com a condução de calor pelo substrato e a radiação de onda longa entre as superfícies do solo e da folha (Figura 6) (SAILOR, 2008).

Figura 6 – Esquema do balanço energético do telhado verde

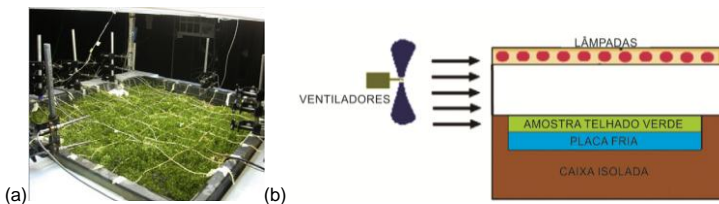


Adaptado de Sailor, 2008 e Ouldboukhitine et al., 2011

Pesquisas experimentais e modelagens numéricas têm sido desenvolvidas com o intuito de compreender os processos de transferência de calor que ocorrem em uma cobertura vegetal.

Ayata, Tabares-Velasco e Srebric (2011) realizaram um estudo experimental em laboratório com o objetivo de poder controlar as condições ambientais e assim poder medir o fluxo de calor sensível. Três tipos diferentes de modelos de transferência de calor por convecção foram comparados e os efeitos na cobertura verde com diferentes velocidades de fluxo de ar foram considerados para regimes de convecção nula e forçada (0 a 3 m/s). Os dados experimentais usados foram obtidos através de um equipamento chamado 'Placa Fria' (*Cold Plate*), que consiste em uma câmara ambiental, onde foi possível controlar parâmetros como temperatura e umidade do ar, que mantiveram uma amostra de telhado verde (Figura 7). Um banco de lâmpadas instaladas no interior da câmara simulou a radiação de ondas curtas exterior. Uma caixa altamente isolada suportou a amostra de telhado verde e, entre a caixa e o isolamento, uma placa fria de cobre ligada a um trocador de calor manteve a temperatura na base da amostra constante e uniforme (TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2011). Os resultados apontaram que, para a faixa experimental de velocidades de vento, não houve impacto significativo nos fluxos de calor sensível. Em contrapartida, esse impacto foi percebido com a mudança do teor de água e diferentes temperaturas.

Figura 7 - Configuração experimental do telhado verde (a) e representação esquemática do aparato experimental (b)



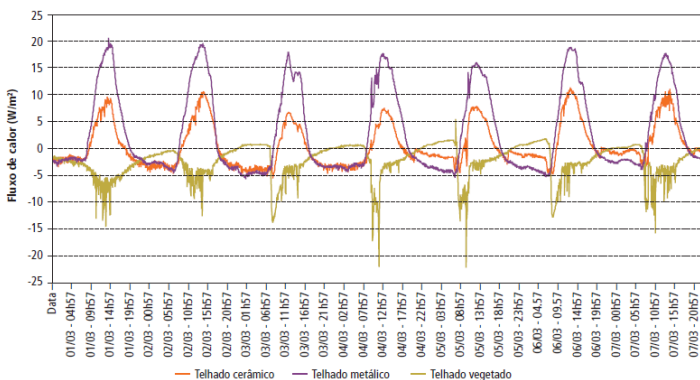
Fonte: Adaptado de Ayata, Tabares-Velasco e Srebric, 2011

A partir dos dados experimentais desse mesmo aparato chamado 'Placa Fria' (*Cold Plate*), Tabares-Velasco e Srebric (2012) validaram um modelo de transferência de calor em telhado verde. O foco do estudo foi o telhado do tipo extensivo por ser a solução economicamente viável mais utilizada nas edificações e levou em consideração três apresentações de telhado verde: com vegetação, sem vegetação e parcialmente vegetado. O comportamento térmico do telhado variou de acordo com o tipo de vegetação utilizada, por causa do sombreamento das plantas, da transpiração e da proteção contra o vento. Das variáveis ambientais, a energia solar foi que demonstrou maior interferências nos resultados, enquanto que o oposto ocorreu com a umidade relativa do ar. Em relação

as variáveis de projeto, o índice de área foliar (IAF - razão entre a área das folhas do dossel e a área projetada/sombreada no solo) se mostrou o fator mais importante na redução da temperatura do substrato e do fluxo de calor. O aumento no teor de água no substrato também revelou redução significativa no fluxo de calor. Apesar do aumento na condutividade térmica do substrato, a taxa de evapotranspiração aumentou significativamente mais, prevalecendo o efeito de resfriamento.

Parizotto Filho (2010) analisou comparativamente as taxas de fluxo de calor de três sistemas de cobertura instalados no projeto Casa Eficiente (resultado da parceria estabelecida entre a ELETROSUL, ELETROBRAS/PROCEL Edifica e a Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, através do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - LabEEE). Os sistemas adotados foram telhado cerâmico, telhado metálico e telhado vegetado. A Figura 8 ilustra o perfil dos fluxos de calor dos três sistemas durante uma semana representativa no verão. Enquanto os telhados cerâmico e metálico atingiram os valores máximos diários de fluxo positivo (entrando para o ambiente interno, por volta das 14h), o telhado verde apresentou alto valor de fluxo negativo, retirando calor do ambiente subjacente.

Figura 8 - Perfil dos fluxos de calor através das coberturas (01 a 07/03/2008)



Fonte: Parizotto Filho, 2010

Ainda na Figura 8 pode-se observar três dias em que o telhado vegetado retirou mais calor do ambiente interno (03 a 05/03/2008). Refere-se a dias em que houve registro de precipitação, potencializando o efeito de resfriamento do sistema (PARIZOTTO FILHO, 2010).

2.3. FUNDAMENTOS PARA PESQUISA EXPERIMENTAL COM TELHADO VERDE

Existem três maneiras de avaliar o desempenho térmico do telhado verde: experimentos de campo ou de laboratório, estudos teóricos / numéricos, e a combinação dos experimentos com modelos numéricos. O foco das medições observadas nos experimentos encontrados na revisão bibliográfica foi avaliar a redução no fluxo de calor, a resistência térmica do telhado verde e a taxa de evapotranspiração (TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2012).

2.3.1. Experimentos de campo ou de laboratório

O procedimento experimental visa comprovar uma ou várias hipóteses relacionadas a um determinado fenômeno, mediante a observação e medição das variáveis que o influenciam (HINZ; 2006). Estudos experimentais de campo com telhados verdes são eficientes para compreensão geral do comportamento térmico em condições climáticas reais. Porém, como as condições reais são instáveis, quando o objetivo é medir cada parâmetro do comportamento, experimentos de laboratório possibilitam maior precisão, já que as condições ambientais podem ser controladas (TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2012). Estudos que apresentam modelos numéricos utilizam experimentos de campo como forma de validação de dados.

Um experimento realizado a partir de um *retrofit*, analisou a influência dos efeitos climáticos nos benefícios energético e térmico do telhado verde (JIM e PENG; 2012). As medições foram realizadas na cobertura da estação de trem Tai Po, em Hong Kong, onde duas estações de monitoramento foram instaladas: uma na porção com cobertura vegetal e outra na porção com laje exposta (Figura 9). As comparações permitiram analisar o comportamento de cada porção em dia ensolarado, nublado e chuvoso, durante o verão. Os resultados apontaram a radiação solar e a umidade relativa do ar como fatores meteorológicos determinantes no comportamento térmico do telhado verde. A alta radiação solar, normalmente associada a baixa umidade relativa do ar, potencializa a evapotranspiração, aumentando a perda de calor latente. Nesse caso, como o gradiente de pressão de vapor entre a superfície da cobertura verde e o ar é elevado (baixa umidade relativa do ar), o processo de resfriamento passivo é significativamente maior, devido ao aumento da taxa de evapotranspiração.

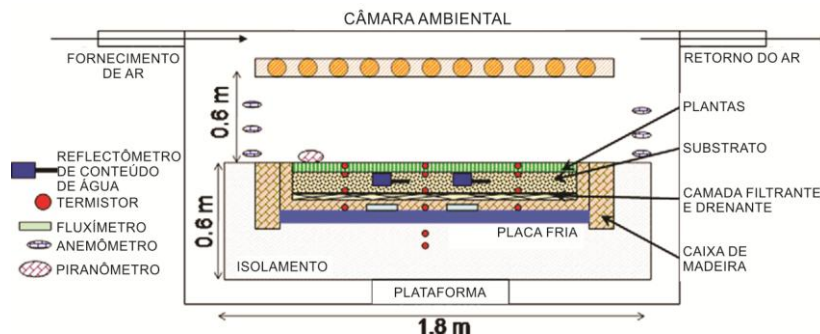
Figura 9 - Localização das estações de monitoramento na cobertura da Estação de Trem Tai Po



Fonte: Jim e Peng, 2012

Tabares-Velasco e Srebric (2011) desenvolveram um aparato experimental chamado 'Placa Fria' (*Cold Plate*) a fim de quantificar os processos de transferência de calor e massa para amostras de telhado verde. O equipamento consiste em uma câmara onde os parâmetros ambientais, como temperatura do ar e umidade, foram controlados em escala real. A caixa que suportava a amostra de telhado verde era altamente isolada para manter um fluxo de calor unidimensional (Figura 10). A placa fria instalada embaixo da amostra, manteve a temperatura na superfície inferior do telhado verde uniforme e constante. Três amostras foram testadas: uma sem vegetação e outras duas com vegetação, porém, de tipos diferentes. Os resultados apontaram a evapotranspiração como o fator mais importante na redução da transferência de calor através do telhado verde. Assim, um sistema de irrigação associado a plantas que tem elevada taxa de evapotranspiração potencializariam os benefícios da cobertura verde.

Figura 10 - Aparato experimental para medições em laboratório para telhado verde



Fonte: Tabares-Velasco e Srebric, 2011

Ainda com base nesse mesmo equipamento, Tabares-Velasco e Srebric (2012) desenvolveram um modelo numérico validado com dados de transferência de calor e massa do modelo experimental. As análises foram realizadas a partir de experimentos de telhado vegetado, semi vegetado e sem vegetação. Os resultados apontam a forte influência do parâmetro índice de área foliar (IAF) na redução do fluxo de calor através do telhado verde.

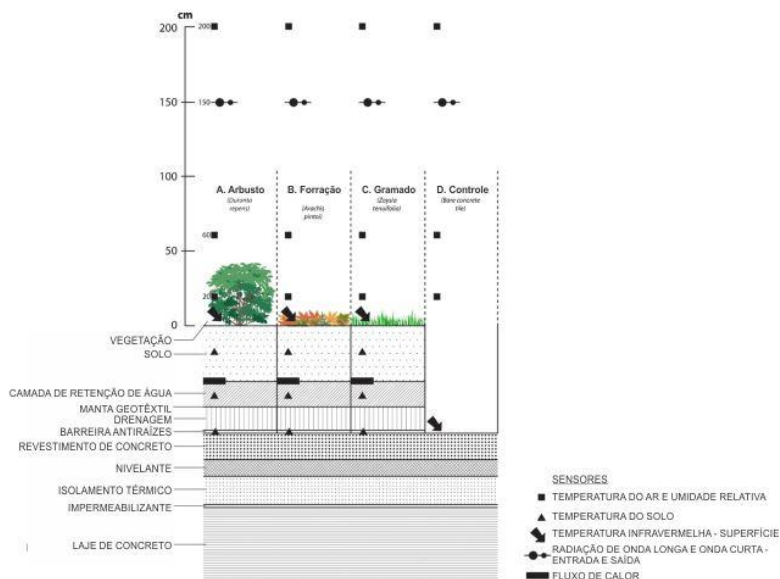
Em outro tipo de experimento, realizado por Ouldboukhitine et al (2011), um modelo numérico foi validado a partir de medições em duas plataformas experimentais (Figura 11). As plataformas foram construídas na escala 1:10, representando duas edificações com diferentes tipos de vegetação na cobertura. Os dados de temperatura na folhagem e na superfície do solo foram comparados. Os resultados apontaram que o aumento na densidade da folhagem diminui a temperatura nas superfícies do solo e da vegetação, pois esse parâmetro influencia as trocas radiativas. Figura 11 - Plataformas experimentais (a) e tipos de vegetação adotados (b) tundra e (c) pampa



Fonte: Ouldboukhitine et al, 2011

O estudo de Jim e He (2010) teve por objetivo investigar as dinâmicas de fluxo de calor e balanço energético do sistema telhado verde pela perspectiva microclimatológica. As medições foram realizadas em quatro parcelas de cobertura 8x8 m em quatro edificações históricas (Figura 12). Uma laje, utilizada como referência, foi apenas revestida com lajota de concreto. As demais eram constituídas pelo sistema telhado verde, porém com diferente espessura de substrato (3, 5 e 8 cm) e diferente cobertura vegetal (gramado, forração e arbusto). Os resultados apontaram forte correlação entre os valores de fluxo de calor latente e sensível com a temperatura e a chuva, porém a resposta dos fluxos de calor em relação a precipitação foi diferente (o fluxo de calor latente aumentou e o fluxo de calor sensível diminuiu após um evento de chuva).

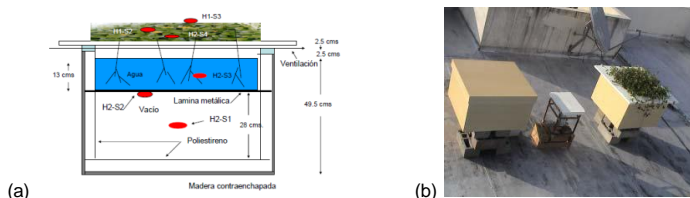
Figura 12 - Corte esquemático da instalação experimental, mostrando as camadas de telhado verde e a organização vertical dos sensores de monitoramento ambiental



Fonte: Jim e He, 2010

Hinz (2006) desenvolveu uma pesquisa cujo objetivo foi determinar a capacidade térmica e o potencial de resfriamento de uma cobertura vegetal combinada a um sistema de resfriamento evaporativo indireto que serviu de substrato para as plantas (Figura 13a). Os resultados foram comparados a um módulo de controle (Figura 13b) e apontaram que o efeito da evapotranspiração da vegetação combinado com a evaporação indireta do sistema passivo alcançou maior resfriamento diurno e noturno quando comparado ao módulo de controle (caixa isolada termicamente).

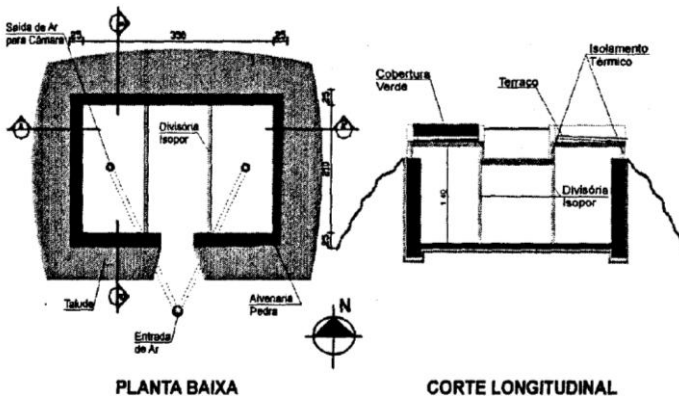
Figura 13 - Módulo de controle e módulo experimental (a) e esquema do módulo experimental (b)



Fonte: Hinz, 2006

Entre as iniciativas desenvolvidas no Brasil, encontra-se o trabalho pioneiro de Pouey, Sattler e Schneider (1998) que avaliou o comportamento térmico da cobertura verde comparada com uma cobertura plana tipo terraço (isolamento térmico mais revestimento cerâmico) a partir de uma bancada experimental (Figura 14). A bancada foi construída na cidade de Pelotas - RS e teve como piso uma laje de concreto e paredes de pedra granulítica, circundada ainda por taludes de terra e coberta por três coberturas independentes, sendo as duas das laterais objeto da pesquisa. Os resultados apontaram que, comparando-se as temperaturas superficiais internas e externas de ambas coberturas, o amortecimento no terraço foi maior. Isso porque a temperatura superficial externa na cobertura verde já era menor do que no terraço, atingindo 35,9°C na primeira e 48,9°C na segunda (enquanto a temperatura do ar externo atingiu a máxima de 35,2°C). Assim, a diferença entre os valores máximos das temperaturas superficiais externa e interna atingiu 20,2°C no terraço e 9,9°C no telhado verde.

Figura 14 - Projeto da bancada experimental



Fonte: Pouey, Sattler e Schneider, 1998

2.3.2. Variáveis e parâmetros de estudos com telhado verde

Na literatura é possível encontrar diversos estudos que tratam do desempenho térmico dos telhados verdes. Cada um aborda o assunto sob diferente perspectiva. A Quadro 1 apresenta uma síntese dos parâmetros e variáveis analisados nos estudos abordados na revisão de literatura.

Quadro 1 - Variáveis e parâmetros encontrados em estudos com telhado verde

| ESTUDO | VARIÁVEIS ANALISADAS | PARÂMETROS CLIMÁTICOS | PARÂMETROS TELHADO VERDE |
|---|---|--|---|
| Jim e Peng (2012) | <ul style="list-style-type: none"> · Temperatura · Fluxo de calor · Conteúdo volumétrico de água | <ul style="list-style-type: none"> · Temperatura e umidade do ar a 10 e 160cm acima da cobertura · Radiação solar · Velocidade do vento | <ul style="list-style-type: none"> · Condutividade térmica do substrato |
| Tabares-Velasco e Srebric (2012) e Tabares-Velasco e Srebric (2011) | <ul style="list-style-type: none"> · Fluxo de calor através do telhado verde · Fluxo de calor convectivo · Temperaturas superficiais · Conteúdo volumétrico de água | <ul style="list-style-type: none"> · Radiação de onda curta e longa incidente · Velocidade do ar · Temperatura e umidade relativa do ar | <ul style="list-style-type: none"> · Taxa de evapotranspiração · Radiação de onda longa emitida · Condutividade térmica do substrato · Índice de área foliar (IAF) · Refletividade espectral da amostra · Espessura substrato |
| Ouldboukhitine et al (2011) | <ul style="list-style-type: none"> · Temperatura na camada do solo e na folhagem · Fluxo de calor | <ul style="list-style-type: none"> · Temperatura e umidade do ar · Radiação de onda curta e longa · Precipitação pluviométrica · Velocidade e direção do vento | <ul style="list-style-type: none"> · Densidade da folhagem |
| Jim e He (2010) | <ul style="list-style-type: none"> · Fluxo de calor · Temperaturas superficiais · Conteúdo volumétrico de água | <ul style="list-style-type: none"> · Radiação de onda curta e longa incidente · Temperatura e umidade relativa do ar · Temperatura do ponto de orvalho · Velocidade e direção do vento · Precipitação pluviométrica | -- |
| Hinz (2006) | <ul style="list-style-type: none"> · Temperatura | <ul style="list-style-type: none"> · Temperatura do ar · Radiação solar direta e difusa | -- |

Continuação Quadro 1

| ESTUDO | VARIÁVEIS ANALISADAS | PARÂMETROS CLIMÁTICOS | PARÂMETROS TELHADO VERDE |
|-----------------------------------|----------------------|---|--------------------------|
| Pouey, Sattler e Schneider (1998) | · Temperatura | · Temperatura e umidade do ar · Precipitação pluviométrica · Número de horas de insolação · Radiação solar global e difusa | -- |

Fonte: elaborado pelo autor

Os parâmetros climáticos registrados para análises que envolvem o sistema telhado verde são semelhantes em todos os estudos, sendo os principais: temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação, velocidade do vento e radiação solar (JIM; HE, 2010; JIM; PENG, 2012; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2011; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2012; OULDBOUKHITINE et al. 2011; HINZ, 2006; POUHEY; SATTLER; SCHNEIDER, 1998).

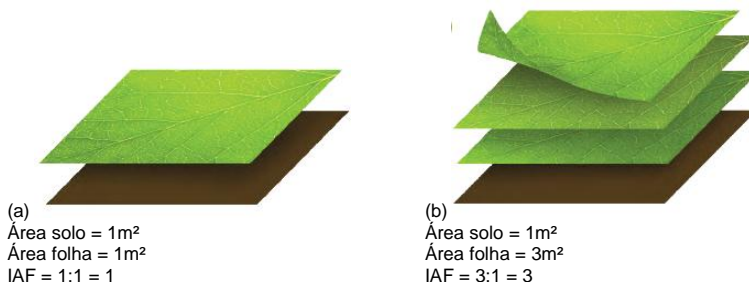
Parâmetros diferenciados foram encontrados em apenas um estudo. Jim e He (2010) registraram em sua estação meteorológica a temperatura de ponto de orvalho, que influencia no fluxo de calor latente, pois estando o ar saturado, não há evaporação da água contida na cobertura vegetal. A liberação de calor para o ambiente interno, normalmente ocorre no período noturno devido a condensação. O maior fluxo de calor latente ocorre quando a alta temperatura coincide com um evento de chuva. O solo úmido após a precipitação pluviométrica, associado a alta radiação solar, potencializa a evaporação da água contida no solo. Já o fluxo de calor sensível diminui em dias chuvosos. Esse fenômeno pode estar relacionado com o efeito de isolamento das nuvens, reduzindo a radiação solar incidente (JIM; HE, 2010).

A radiação solar e umidade relativa do ar são os principais fatores meteorológicos que resultam em variações térmicas no telhado verde. Radiação solar alta combinada com baixa umidade relativa do ar pode otimizar seu desempenho. Entretanto, a alta umidade relativa do ar induz a diminuição das temperaturas superficiais. Isso porque a alta umidade normalmente está associada a baixa radiação solar (JIM; PENG, 2012). Menores temperaturas superficiais também são encontradas quando a velocidade do ar é elevada. No entanto, o aumento da velocidade do ar não aumenta o fluxo de calor convectivo, pois a diferença de temperatura entre as plantas e o ar circundante diminui. Em contrapartida, a taxa de evapotranspiração aumenta (TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2011).

Dos parâmetros do telhado verde apontados na literatura revisada, alguns se destacam por contribuir de alguma forma no comportamento térmico do sistema telhado verde. Na camada de vegetação, o índice de

área foliar (IAF) se destaca por influenciar na quantidade de radiação solar que atinge o substrato e também na taxa de evapotranspiração. O índice de área foliar é a razão entre a área de folhas e a área do solo. Por exemplo, se uma determinada porção vegetada apresenta IAF igual a 1 (Figura 15a), a proporção de área de folha e área de solo é de 1:1. Se IAF é igual a 3 (Figura 15b), a proporção de área de folha e área de solo é de 3:1. Tradicionalmente pesquisadores mediram o IAF diretamente colhendo folhas de um terreno e medindo a área de cada uma delas. Atualmente equipamentos permitem medir indiretamente o IAF a partir de variáveis relacionadas, como a quantidade de luz que é transmitida ou refletida por uma copa (DECAGON DEVICES, 2014). Tabares-Velasco e Srebric (2012), em uma variação do índice de área foliar de 0,5 a 3,5, constataram uma redução no fluxo de calor através do solo de 63,5 W/m² para 9,1 W/m².

Figura 15 - Representação conceitual da copa da planta onde IAF = 1 (a) ou IAF = 3 (b)



Fonte: Decagon Devices, 2014

A refletividade espectral da amostra foi citada apenas por Tabares-Velasco e Srebric (2011 e 2012). Esse parâmetro indica quanto da radiação solar incidente é refletida pelo material. Espécies de plantas com menor refletividade resultam em um saldo de radiação maior (ZHAO et al, 2014).

Na camada de substrato, a condutividade térmica é um parâmetro essencial na transferência de calor por condução. Essa propriedade depende da composição mineral do solo, da densidade drenada e do teor de água. Apesar de a condutividade térmica aumentar à medida que se aumenta o teor de umidade no solo, Tabares-Velasco e Srebric (2011) demonstraram que o fluxo de calor através do substrato aumentou quando o solo estava seco, contrariando a expectativa. O resfriamento do sistema causado pelo aumento da taxa de evapotranspiração, quando o solo estava úmido, possibilitou um fluxo de calor reduzido em relação à quando o solo estava seco. A alteração do substrato da condição seco para úmido diminuiu 10°C a sua temperatura superficial e reduziu em 40% o fluxo de calor.

A espessura do substrato é outra variável que altera a taxa de calor transferida através da camada. Tabares-Velasco e Srebric (2012) em uma

variação da espessura do substrato de 3 a 15 cm constataram uma redução no fluxo de calor através do solo de 63,6 W/m² para 18,9 W/m².

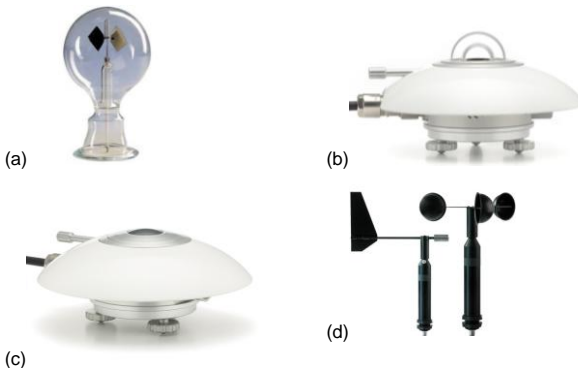
2.3.3. Instrumentação genérica recomendada

Os dados para análises em telhados verdes são registrados e armazenados por diferentes instrumentos que dependem do método de pesquisa e dos resultados que se espera alcançar. Eles podem coletar dados climáticos e dados dos componentes construtivos do sistema.

Para a coleta de dados climáticos, os instrumentos mais comuns nesse tipo de estudo são radiômetro (Figura 16a), piranômetro (Figura 16b) e pirgeômetro (Figura 16c) para medir a radiação solar; anemômetro para medir a velocidade do vento (Figura 16d); pluviômetro para medir a precipitação pluviométrica; termistor (sensor de temperatura do ar) e sensor de umidade do ar (JIM; PENG, 2012; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2011; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2012; OULDBOUKHITINE et al. 2011; JIM; HE, 2010; HINZ, 2006; POUHEY; SATTTLER; SCHEIDER, 1998).

Os sensores utilizados para medição dos parâmetros associados aos componentes do telhado verde são os termistores (Figura 17a) e termopares (sensores de temperatura superficial), sensor de umidade do solo (Figura 17b) e sensores de fluxo de calor (Figura 17c) instalados na superfície superior do componente estrutural (JIM; PENG, 2012; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2011; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2012; OULDBOUKHITINE et al. 2011; JIM; HE, 2010; HINZ, 2006; POUHEY; SATTTLER; SCHEIDER, 1998).

Figura 16 - Sensores de dados climáticos: radiômetro (a), piranômetro (b), pirgeômetro (c), anemômetro (d)

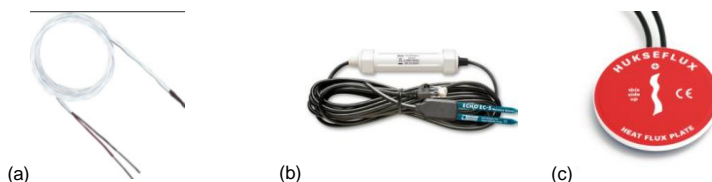


Fonte: M42 Scienza e Natura³ (a); Hukseflux Brasil⁴ (b) (c); Romiotto⁵ (d)

³ Disponível em: <http://www.m42.it/radiometro_crookes>. Acesso em: 26 mai. 2016.

⁴ Disponível em: <<http://www.huksefluxbrasil.com.br/pagina/produtos-e-servicos.html>>. Acesso em: 26 mai. 2016.

Figura 17 – Termistor Omega 44033 (a), sensor de umidade do solo Onset Hobo S-SMC (b), sensor de fluxo de calor HFP01SC of Hukseflux (c)



Fonte: Omega Emgineering⁶ (a); Onset Computer Corporation⁷ (b); Hukseflux Brasil⁸ (c)

Os termopares são formados por fios de metal diferentes e geram tensão elétrica. Essa tensão está relacionada com a diferença de temperatura entre a junta de medição e a junta de referência. Conhecendo-se a temperatura na junta de referência e a tensão nos fios, tem-se a temperatura na junta de medição. Os termistores (Figura 17a) são formados por metais semicondutores e apresentam variação de resistência elétrica quando submetidos a diferentes temperaturas. Os termistores do tipo NTC (coeficiente de temperatura negativo) apresentam variação inversamente proporcional, onde a resistência diminui à medida que a temperatura se eleva. Os termistores do tipo PTC (coeficiente de temperatura positivo) apresentam variação diretamente proporcional.

Nos telhados verdes extensivos, os sensores de temperatura superficial são, normalmente, instalados nas folhas das plantas e nas superfícies inferior e superior do substrato (JIM; PENG, 2012; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2011; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2012; OULDBOUKHITINE et al. 2011; JIM; HE, 2010; POUHEY; SATTLER; SCHEIDER, 1998).

O sensor de umidade do solo (Figura 17b) é composto por dois eletrodos (hastes) que, quando em contato com o solo, permitem a circulação de corrente elétrica, possibilitando a leitura do nível de umidade por comparação com a resistência. Quanto maior o teor de umidade, menor a resistência e maior a tensão entre as hastes. Apesar de aumentar a condutividade térmica no solo, o fornecimento de umidade é necessário para sustentar o efeito de resfriamento por evapotranspiração, processo

⁵ Disponível em: <<http://romiotto.com.br/produtos/detalhes/466/anemometro-profissional-de-velocidade-do-vento>>. Acesso em: 26 mai. 2016.

⁶ Disponível em: <<http://www.omega.com/pptst/TH-44000.html>>. Acesso em: 26 mai. 2016.

⁷ Disponível em: <<http://www.onsetcomp.com/products/sensors/s-smc-m005>>. Acesso em: 26 mai. 2016.

⁸ Disponível em: <<http://www.huksefluxbrasil.com.br/pagina/produtos-e-servicos.html>>. Acesso em: 26 mai. 2016.

importante na redução da transferência de calor através do telhado verde (JIM; PENG, 2012; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2011).

A taxa de energia transferida através de uma dada superfície é medida pelo sensor de fluxo de calor (Figura 17c). O transdutor gera um sinal elétrico proporcional ao fluxo de calor total na superfície do sensor. Nos telhados verdes, o transdutor normalmente é instalado na superfície superior do componente estrutural, registrando o calor conduzido através das camadas que o compõem (JIM; PENG, 2012; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2011; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2012; OULDBOUKHITINE et al. 2011; JIM; HE, 2010).

Outros instrumentos encontrados na literatura, porém com menor frequência são o termômetro infravermelho (Figura 18a) específico para áreas externas para medição das temperaturas superficiais (JIM; HE, 2010; JIM; PENG, 2012); o espectrorradiômetro de campo (Figura 18b) para medição da refletividade espectral do telhado verde; e o lisímetro de pesagem (Figura 18c) para medição da evapotranspiração (TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2011).

Figura 18 - Sensores diferenciados: termômetro infravermelho Apogee (a), espectrorradiômetro ASD Inc. FieldSpec (b), lisímetro Sartorius IS 300 IGG-H platform (c)



Fonte: Apogee Instruments⁹ (a); ASD¹⁰ (b); Sartorius Intec¹¹ (c)

A refletividade de um material, medida pelo espectrorradiômetro de campo (Figura 18b), indica quanto da radiação solar incidente é refletida. Zhao et al (2014) realizaram um estudo comparativo com diferentes espécies de plantas (seduns) e diferentes tipos de substratos. Os resultados apontam que a refletividade espectral pode variar para diferentes tipos de plantas e substratos no mesmo comprimento de onda. A refletividade espectral das plantas aumentou e alcançou o maior intervalo quando o comprimento de onda variou de 800 a 1000 nm. Este é um comportamento típico das plantas já que a radiação fotossinteticamente ativa ocorre na faixa

⁹ Disponível em: <<http://www.apogeeinstruments.co.uk/infraredradiometer/>>. Acesso em: 26 mai. 2016.

¹⁰ Disponível em: <<http://www.asdi.com/products-and-services/fieldspec-spectroradiometers/>>. Acesso em: 26 mai. 2016.

¹¹ Disponível em: <<http://www.sartorius-intec.com/en/product/product-detail/is150igg-h/>>. Acesso em: 26 mai. 2016.

de 400 a 700 nm. A partir daí a radiação é refletida por não ser mais útil para fins fotossintéticos. Plantas com refletividade baixa resultam em valores maiores de fluxo de calor incidente sobre o telhado verde. O substrato não representa impacto no saldo de radiação por estar coberto pelas plantas.

A refletividade espectral medida no estudo de Tabares-Velasco e Srebric (2011) incluiu a combinação de plantas com substrato, portanto a medição não ocorreu independentemente. A refletividade para a faixa visível (400-700 nm), o infravermelho próximo (700-1200 nm) e a maior parte do espectro solar (350-2300 nm) encontradas foram, respectivamente, 0,03, 0,27 e 0,06.

A evapotranspiração é um processo combinado de perda de água a partir do solo (evaporação) e plantas (transpiração). O lisímetro de pesagem (Figura 18c) possibilita quantificar a taxa de evapotranspiração medindo diretamente a perda de água por meio de um sensor de carga (TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2011).

2.4. TELHADO VERDE COMO ESTRATÉGIA BIOCLIMÁTICA PARA FLORIANÓPOLIS

O projeto de arquitetura que visa atingir um desempenho térmico adequado, deve ser planejado de modo a garantir a integração com o entorno. Se, por um lado, há fatores dos quais se pode tirar partido durante o projeto, por outro, é preciso proteger a edificação daqueles que podem comprometer sua eficiência. Para tanto é preciso conhecer o clima em que a edificação será inserida a fim de integrar os conceitos da bioclimatologia à arquitetura.

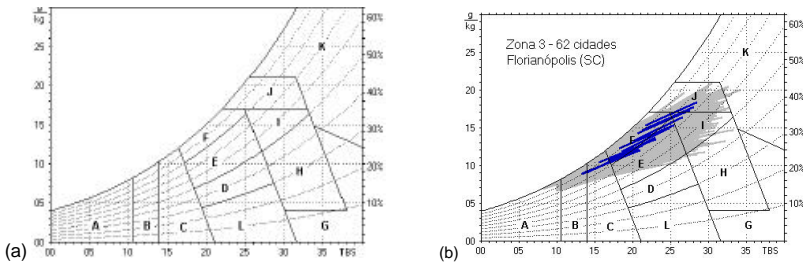
A presença do solo na composição do telhado verde o caracteriza como estratégia de elevada inércia térmica. Porém este fenômeno ocorre juntamente com a capacidade de resfriamento do sistema pela presença da camada de vegetação (responsável pelo processo de evapotranspiração). A camada de vegetação ainda é responsável pelo sombreamento da cobertura e absorção de parte da radiação solar incidente para o processo de fotossíntese. Essa combinação de fenômenos configura o telhado verde como estratégia de projeto bioclimático.

2.4.1. Estratégias para condicionamento térmico

A Carta Bioclimática para Edifícios, desenvolvida por Givoni (1992), foi construída sobre o diagrama psicrométrico e propõe estratégias construtivas para adequação da arquitetura ao clima.

A Figura 19a apresenta a classificação bioclimática da NBR 15.220-3 (ABNT, 2005b) que adotou a Carta Bioclimática adaptada a partir da sugerida por Givoni (1992). A Figura 19b apresenta as normais climatológicas para a Zona Bioclimática 3, a qual pertence a cidade de Florianópolis.

Figura 19 - Carta Bioclimática da NBR 15.220-3 adaptada de Givoni (a) e normas climatológicas para a Zona Bioclimática 3 (b)

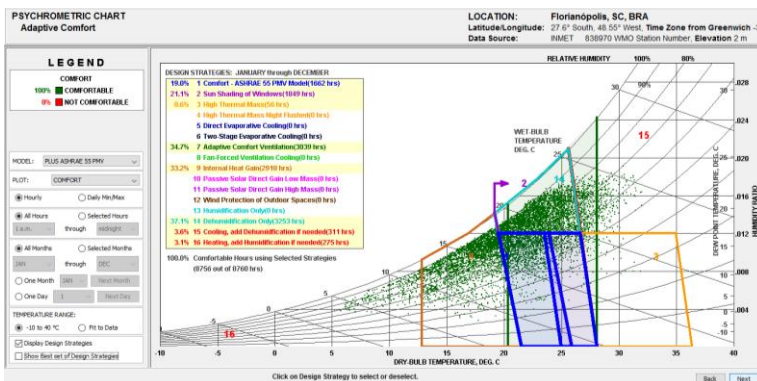


Fonte: ABNT, 2005b

As estratégias bioclimáticas sugeridas a partir das normas climatológicas abrangem as zonas B (aquecimento solar da edificação), C (massa térmica para aquecimento), F (desumidificação / renovação do ar), I+J (ventilação). A zona E caracteriza a zona de conforto térmico.

A Carta Psicrométrica obtida no programa *Climate Consultant* (A.UD, 2012) a partir do modelo de conforto adaptativo da norma ASHRAE 55 (condições ambientais térmicas para ocupação humana), indica que, em um período anual, a porção que apresenta condição de conforto para a cidade de Florianópolis é de 19% (Figura 20). Em 34,7% do período é possível encontrar conforto a partir do modelo adaptativo. Isso significa que, em espaços naturalmente ventilados, a resposta térmica dos ocupantes vai depender, em parte, do clima ao ar livre e pode ter um alcance mais amplo do que o conforto em edifícios com sistemas de climatização centralizados.

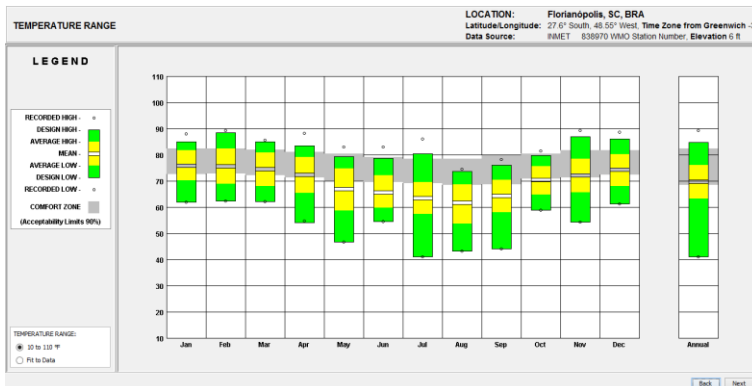
Figura 20 - Carta Psicrométrica para Florianópolis pelo *Climate Consultant*



Fonte: A.UD, 2012

A fim de analisar separadamente os períodos de frio e calor, a carta de temperaturas obtida através do mesmo programa orientou a divisão do período anual em dois (Figura 21). Na carta observa-se que os meses cujas temperaturas médias diárias estão abaixo da zona de conforto compreendem o período de maio a outubro. Portanto esse foi selecionado como período frio e os meses de novembro a abril, período quente.

Figura 21 - Carta de temperatura para Florianópolis pelo *Climate Consultant*



Fonte: A.UD, 2012

A partir da definição dos períodos de frio e calor, torna-se possível analisar as principais estratégias de projeto indicadas pelo *Climate Consultant* (A.UD, 2012) (Tabela 1).

Tabela 1 - Estratégias bioclimáticas para Florianópolis pelo *Climate Consultant*

| ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS | | | |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------|-------|
| Período: novembro a abril (calor) | | Período: maio a outubro (frio) | |
| Conforto: 17,7% | | Conforto: 20,2% | |
| Desumidificação | 57,0% | Ganho de calor interno | 55,6% |
| Conforto adaptativo (ventilação) | 50,8% | Conforto adaptativo (ventilação) | 18,8% |
| Sombreamento | 26,5% | Desumidificação | 17,6% |
| Ganho de calor interno | 10,5% | Sombreamento | 15,8% |
| Resfriamento | 6,9% | Aquecimento | 6,0% |
| Alta massa térmica | 1,0% | Alta massa térmica | 0,3% |
| Aquecimento | 0,2% | Resfriamento | 0,2% |

Fonte: elaborado pelo autor

As estratégias bioclimáticas sugeridas a partir do *Climate Consultant* (A.UD, 2012) são semelhantes as estratégias de projeto encontradas na NBR 15.220-3 (ABNT, 2005b). Apesar de as fontes consultadas para a

redação do item 2.4 não evidenciarem o uso do telhado verde como uma estratégia bioclimática, os dados apresentados nos itens 2.2 e 2.3 da revisão de literatura levam a sugerir o uso do telhado verde como um potencial sistema relacionado ao sombreamento, a elevada inércia térmica e ao resfriamento passivo.

2.4.2. Parâmetros construtivos

Os parâmetros relativos ao desempenho térmico das coberturas na Zona Bioclimática 3 recomendados pelas principais normas, regulamentos e certificações brasileiros foram sistematizados na Tabela 2. O valor da transmitância térmica (U) varia de acordo com a condicionante: absorvância solar (α) e ambiente condicionado artificialmente ou não.

Tabela 2 - Parâmetros de desempenho térmico para cobertura segundo normas, regulamentos e certificações brasileiros

| NORMA, REGULAMENTO, CERTIFICAÇÃO | CONDICIONANTE | U (W/m ² K) | NÍVEL DE CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO |
|----------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|
| 15.220-2 | --- | $\leq 2,0$ | MÍNIMO |
| 15.575-5 | $\alpha \leq 0,6$ | $\leq 2,3$ | MÍNIMO |
| | | $\leq 1,5$ | INTERMEDIÁRIO |
| | | $\leq 1,0$ | SUPERIOR |
| | $\alpha > 0,6$ | $\leq 1,5$ | MÍNIMO |
| | | $\leq 1,0$ | INTERMEDIÁRIO |
| | | $\leq 0,5$ | SUPERIOR |
| RTQ-R | $\alpha \leq 0,6$ | $\leq 2,3$ | A ou B |
| | $\alpha > 0,6$ | $\leq 1,5$ | A ou B |
| RTQ-C ¹² | Amb. condicionado | $\leq 1,0$ | A |
| | | $\leq 1,5$ | B |
| | Amb. não condicionado | $\leq 2,0$ | A ou B |
| AQUA-HQE | $\alpha \leq 0,6$ | $\leq 2,3$ | MÍNIMO |
| | $\alpha > 0,6$ | $\leq 1,5$ | MÍNIMO |
| LEED ¹³ | Amb. condicionado | $\leq 1,0$ | PRERREQUISITO |
| | Amb. não condicionado | $\leq 2,0$ | PRERREQUISITO |

Fonte: elaborado pelo autor

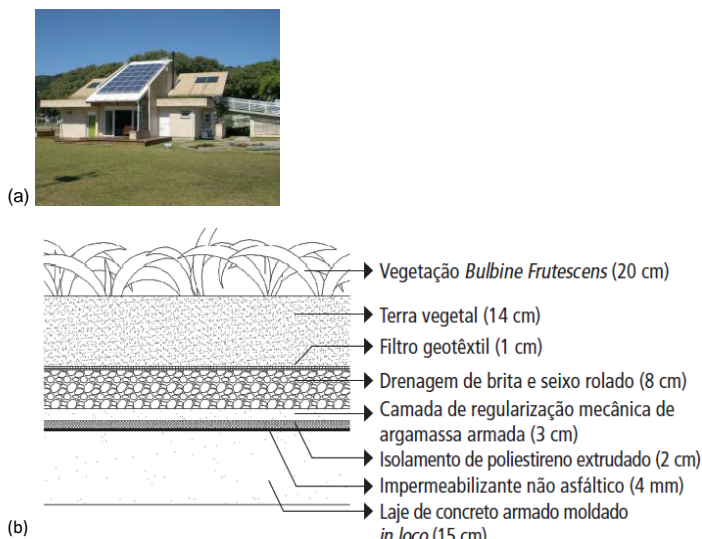
¹² O Regulamento Técnico da Qualidade para Edifícios Comerciais, de Serviço e Público (RTQ-C) reconhece o telhado verde como prerequisite para coberturas caso a absorvância solar seja superior a 0,50.

¹³ Para a certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) o prerequisite para performance energética mínima é alcançado pelo projeto ou construção que possua a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nível A do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE Edifica) em todas as categorias (envoltória, iluminação e condicionamento de ar). Portanto os parâmetros relativos ao desempenho térmico são os mesmos do RTQ-C.

O cálculo da resistência e transmitância térmicas conforme sugere a NBR 15.220-2 (ABNT, 2005a) é complexo de se aplicar a coberturas verdes. As propriedades térmicas do telhado verde podem variar dependendo do teor de umidade presente no substrato. A elevada capacidade térmica da água faz com que o calor seja conduzido mais rapidamente em solos úmidos. Em telhados verdes extensivos (menor espessura de substrato) os valores encontrados para resistência térmica variam de 0,37 a 0,85 $\text{m}^2\text{K/W}$ (TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2011).

No telhado verde instalado no projeto Casa Eficiente (Figura 22a), os valores encontrados para parâmetros de absorvância solar e transmitância térmica foram 0,55 e 0,82 $\text{W/m}^2\text{K}$, respectivamente. Portanto, o telhado verde com a composição apresentada atende o mais alto nível de desempenho de todas as normas, regulamentos e certificações analisados no presente estudo. Vale ressaltar que na composição do sistema foi adicionada uma camada de isolamento térmico (Figura 22b).

Figura 22 - Casa Eficiente (a) e composição do telhado verde instalado (b)



Fonte: PROURB¹⁴ (a); Parizotto Filho, 2010 (b)

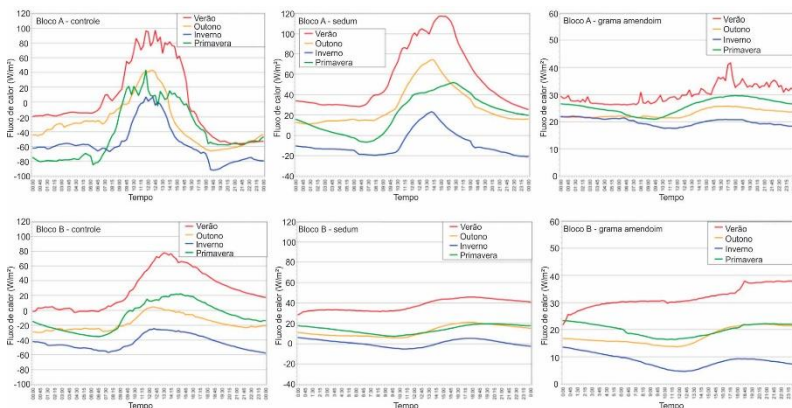
No mesmo projeto, as taxas de fluxo de calor através do telhado verde foram comparadas com as taxas do telhado cerâmico ($U_{\text{cob}} = 0,57 \text{ W/m}^2\text{K}$) e telhado metálico ($U_{\text{cob}} = 0,87 \text{ W/m}^2\text{K}$), instalados na mesma

¹⁴ Disponível em: <www.prourb.fau.ufrj.br/jkos/p4/casa_eficiente/pages/CasaEficiente_30.htm>. Acesso em: 12 nov.2015.

edificação e ambos com uma camada de isolante térmico lã de rocha (2,5 cm de espessura). Segundo o estudo, em uma semana representativa de verão o telhado verde diminuiu consideravelmente o ganho de calor em relação às coberturas cerâmica e metálica, com reduções de 82% e 86%, respectivamente. Aumentou também a perda de calor em 48% em relação à cobertura cerâmica e 35% em relação à cobertura metálica (PARIZOTTO FILHO, 2010). Esses resultados são possíveis devido ao potencial de resfriamento do telhado verde, que perde calor no processo de evapotranspiração.

Jim (2015) analisou durante um ano o fluxo de calor através de seis sistemas de coberturas. O ensaio foi desenvolvido na cobertura de dois blocos (A e B) de edifícios no clima subtropical úmido de Hong Kong. A cobertura de cada edifício compreendia três parcelas de diferentes sistemas: uma parcela de controle sem telhado, uma parcela de telhado verde com plantas suculentas do tipo '*sedum*' e uma terceira parcela também de telhado verde, porém com grama amendoim (ambas com 5 cm de substrato). O bloco A não possuía isolamento térmico, enquanto que o bloco B, além das mesmas parcelas do primeiro bloco, possuía uma camada de isolamento térmico (poliestireno). Os resultados apontaram que o telhado verde tipo '*sedum*' sem isolamento permitiu que a taxa de transferência de calor fosse maior que do telhado de controle (Figura 23). O fluxo de calor excedeu 40 W/m^2 por 12 horas (alcançando quase 120 W/m^2) enquanto que no Controle esse período foi de 6 horas (em um dia ensolarado de verão). Isso porque a área de sombreamento desse tipo de planta não é alta, além da taxa de evapotranspiração ser reduzida em plantas suculentas. Na construção com isolamento térmico, o ganho de calor foi significativamente reduzido, ficando próximo dos 40 W/m^2 (com amplitude máxima de $17,5 \text{ W/m}^2$). No caso do telhado verde com grama amendoim e sem isolamento (planta que fornece maior cobertura de folhagem e apresenta uma estrutura mais complexa) houve redução no ganho de calor em relação ao Controle (apenas por 0,5 horas o fluxo de calor excedeu 40 W/m^2). A mesma parcela na construção com isolamento térmico não apresentou diferença significativa na redução de ganho de calor. Dependendo da complexidade do sistema do telhado verde, este pode substituir o isolamento em termos de benefícios térmicos.

Figura 23 - Fluxo de calor através da cobertura para dias ensolarados nas quatro estações



Fonte: Adaptado de Jim, 2015

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescente incentivo ao uso da tecnologia telhado verde por parte de políticas públicas e de certificações ambientais para a construção civil exige o conhecimento científico como suporte às discussões que envolvem essa técnica.

Em uma análise econômica, os custos de instalação e manutenção do telhado verde não compensam a economia de energia com resfriamento quando comparado com telhado branco. Porém, considerando aspectos ambientais, diversos benefícios são relacionados nos estudos que abordam o tema telhado verde, entre eles a redução do efeito ilha de calor e a retenção de águas pluviais.

O processo de transferência de calor em um telhado vegetado é diferente em relação a outros tipos de coberturas. Isso se dá pela presença da vegetação que, no processo de evapotranspiração, faz com que parâmetros de temperatura, umidade relativa e radiação solar variem. Assim, estudos aprofundados sobre a dinâmica do telhado verde e sua influência no desempenho térmico do sistema de cobertura são fundamentais. Os resultados desses estudos apontam que o teor de água no substrato e a temperatura têm impacto significativo no fluxo de calor sensível (TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2011; JIM; HE, 2010). O tipo de vegetação também influencia no desempenho térmico do telhado, pois além do processo de evapotranspiração, as plantas protegem o sistema do vento e sombreiam o substrato, reduzindo a temperatura do mesmo e também o fluxo de calor através da cobertura.

Dos parâmetros apontados na literatura revisada, alguns se destacam por contribuir de alguma forma no desempenho térmico do

sistema telhado verde. Na camada de vegetação são relevantes a fração de terra coberta pela vegetação e o índice de área foliar. Na camada de substrato, os parâmetros que se destacam são espessura, densidade, condutividade térmica e teor de umidade (MOODY; SAILOR, 2013).

A sobreposição da camada de substrato e vegetação do sistema telhado verde o configura como um elemento de elevada inércia térmica e potencial para resfriamento passivo, caracterizando-o como estratégia de projeto bioclimático para a cidade de Florianópolis. Os estudos apresentados na revisão bibliográfica (PARIZOTTO FILHO, 2010; JIM; 2015) ainda relatam seu potencial de isolamento, podendo atender aos requisitos nas normas, regulamentos e certificações brasileiros.

3. MÉTODOS, FERRAMENTAS E TÉCNICAS

A pesquisa adotada foi do tipo experimental, ou seja, visou identificar os fatores que contribuem na ocorrência de determinado fenômeno a partir de um objeto de estudo. Neste, foram observados os efeitos produzidos pelas variáveis identificadas como capazes de influenciá-lo.

O procedimento experimental permite medições de campo em condições reais. A partir dos dados medidos, foram determinados indicadores capazes de caracterizar o desempenho térmico do telhado verde.

A seguir são descritas detalhadamente cada etapa do trabalho, com os procedimentos e técnicas adotados.

3.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL COM TELHADO VERDE

Este experimento teve como finalidade identificar elementos que compõem o sistema telhado verde e que são capazes de contribuir no processo de transferência de calor através da cobertura. O ensaio foi realizado no município de Florianópolis, localizado no estado de Santa Catarina, $27^{\circ}35'48''$ S de latitude e $48^{\circ}32'57''$ O de longitude, na região Sul do Brasil.

3.1.1. Bancada experimental para medições em telhado verde

A bancada experimental de medição em campo foi montada na cobertura do bloco B do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (Figura 24). Neste local a bancada ficou exposta ao sol e às intempéries, como vento e chuva, retratando uma situação real.

Figura 24 - Local de implantação da bancada experimental na cobertura do bloco B do Departamento da Engenharia Mecânica



Fonte: Google Maps, 2015

A construção da bancada experimental foi iniciada em outubro de 2014 sob coordenação do Professor Dr. Saulo GÜths, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, orientador da doutoranda Caren Michels, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da mesma Universidade que desenvolveu sua pesquisa no mesmo aparato experimental. Ambos já desenvolveram pesquisas relacionadas a coberturas anteriormente (MICHELS; LAMBERTS; GÜTHS, 2008a; MICHELS; LAMBERTS; GÜTHS, 2008b). A execução contou com o apoio da equipe do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas - LMPT. Em novembro de 2014 foi dada a oportunidade para o desenvolvimento da pesquisa objeto dessa dissertação, com minha participação efetiva na construção da bancada iniciando em janeiro de 2015.

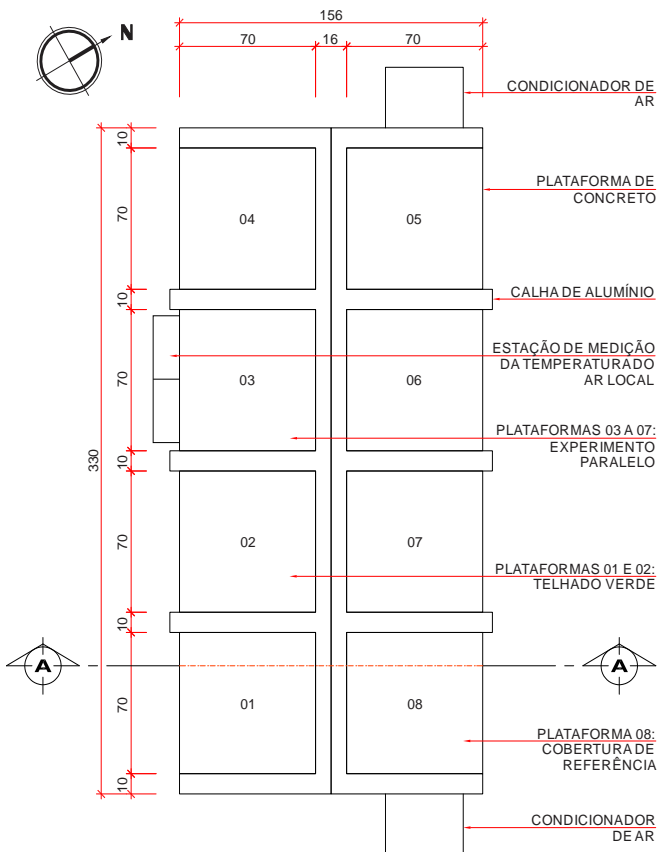
Na bancada, oito plataformas de concreto permitiram diversos ensaios simultâneos, sendo que cinco plataformas fizeram parte da pesquisa em desenvolvimento pela doutoranda Caren Michels, duas plataformas fizeram parte da pesquisa objeto deste trabalho de mestrado e uma plataforma foi utilizada como referência para ambas pesquisas.

No experimento foram monitorados dados de temperatura superficial e fluxo de calor através da cobertura. Estes foram os principais parâmetros medidos e analisados na literatura revisada (JIM; HE, 2010; JIM; PENG, 2012; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2011; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2012; OULDBOUKHITINE et al. 2011; HINZ, 2006; POUHEY; SATTLER; SCHNEIDER, 1998). Os dados foram registrados pela Unidade de aquisição e registro de dados Agilent-HP modelo 34970A.

A bancada experimental consistiu em uma câmara estruturada por cantoneiras metálicas com fechamento externo em chapa de alumínio (laterais e fundo) e isolamento interno com poliestireno expandido 5 cm de espessura a fim de reduzir as trocas térmicas entre o interior e o exterior. As dimensões gerais da câmara são 3,30 m de comprimento, 1,56 m de largura e 1,10 m de altura. A construção de duas metades iguais de 0,78 m de largura permitiu que um dos lados fosse móvel, possibilitando a abertura para manutenção interna da bancada experimental. No fundo da bancada, externamente, sarrafos de madeira auxiliaram na movimentação do aparato. Dois condicionadores de ar do tipo janela (um de 7500 BTU e outro de 9000 BTU) foram instalados no lado fixo da bancada, que associados a duas bancadas de resistências elétricas com 200 W cada, mantiveram a temperatura interna constante com o auxílio de um controlador Proporcional Integral Derivativo - PID (Figura 25 a Figura 28).

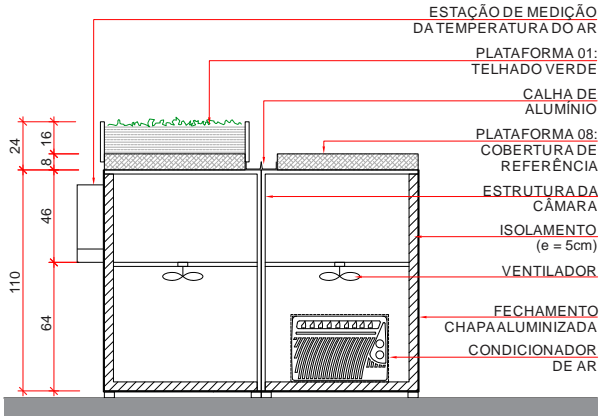
Sobre a bancada, oito lajes de concreto (plataformas) com dimensões 70x70 cm e 8 cm de altura suportaram as amostras de cobertura. Entre as plataformas, a instalação de calhas de alumínio garantiu a estanqueidade da bancada. Sob cada uma das lajes, no interior da câmara, um ventilador auxiliou na distribuição uniforme do ar refrigerado.

Figura 25 - Planta baixa bancada experimental



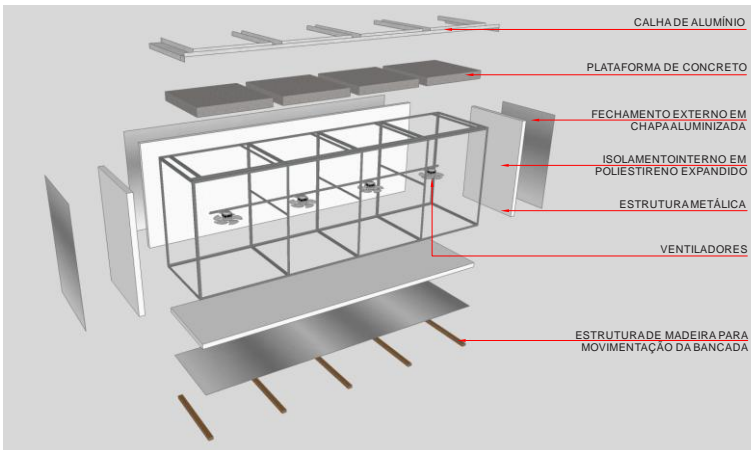
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 26 - Corte esquemático AA da bancada experimental



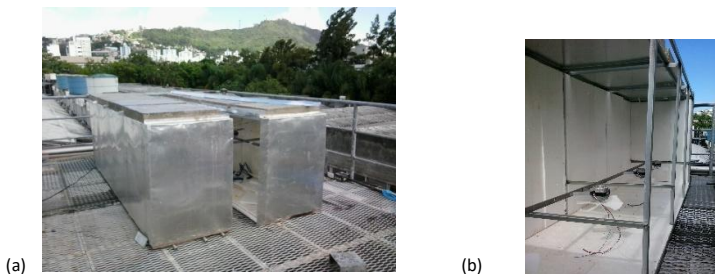
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 27 - Sequência de montagem da bancada experimental (lado móvel)



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 28 - Exterior (a) e interior (b) da bancada experimental



Fonte: acervo do autor - jan. 2015

3.1.2. Dados climáticos

Os dados climáticos foram obtidos através da estação meteorológica do Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia (LEPTEN), do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, distante aproximadamente 90 metros do local onde foi montada a bancada experimental (Figura 24).

Os dados disponibilizados pela estação meteorológica e utilizados nessa pesquisa foram radiação solar global, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica.

Além dos dados climáticos fornecidos pela estação meteorológica, um termopar tipo T foi instalado no local de implantação da bancada experimental para medição precisa da temperatura do ar externo local. O termopar foi inserido em um tubo de policloreto de polivinila (PVC) isolado e protegido da radiação solar direta. Um exaustor acoplado na entrada do tubo garantiu que o ar externo estivesse sempre em movimento no interior do equipamento, reduzindo a influência da radiação térmica (Figura 29).

Figura 29 - Equipamento para medição da temperatura externa local



Fonte: acervo do autor - fev. 2015

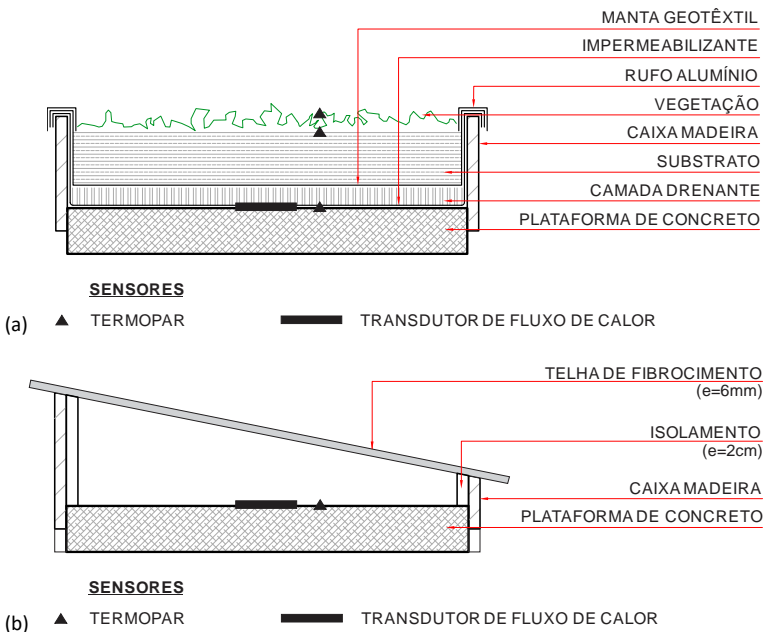
3.1.3. Instrumentação e variáveis analisadas

As plataformas com telhado verde foram equipadas com sensores de medição de temperatura (termopares tipo T) instalados na superfície superior da laje de concreto, na superfície superior do substrato (abaixo de uma fina camada de terra) e no dossel das folhas das plantas (Figura 30a).

O transdutor de fluxo de calor instalado com pasta térmica na superfície superior da laje de concreto (parte central) mediu o fluxo de calor através do sistema telhado verde.

A amostra de referência (cobertura com telha de fibrocimento de espessura igual a 6 mm) foi equipada com os mesmos sensores, instalados na superfície de contato superior da laje de concreto (Figura 30b).

Figura 30 - Instrumentação e composição do telhado verde (a) e da cobertura de referência (b)



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 31 mostra os sensores (termopar tipo T e transdutor de fluxo de calor) instalados na superfície de contato superior do componente estrutural.

Figura 31 - Sensores instalados na superfície superior da plataforma de concreto



Fonte: acervo do autor - set. 2015

Na superfície inferior das plataformas, uma lâmina de poliestireno expandido 5 mm, com dimensões iguais a laje, foi aplicada a fim de simular a resistência térmica superficial interna do ar (Equação 1). Considerando a direção do fluxo de calor descendente, essa resistência é de 0,17 m²K/W (ABNT, 2005c). Sobre a lâmina, uma chapa de alumínio de 3 mm foi parafusada com o objetivo de distribuir uniformemente a temperatura do ar interno em toda superfície da plataforma (Figura 32).

$$R = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,005}{0,03} = 0,16666 \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad (1)$$

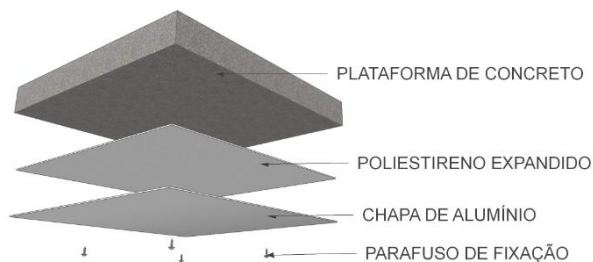
Onde:

R = Resistência térmica (m²K/W)

e = Espessura (m)

λ = Condutividade térmica (W/mK)

Figura 32 - Representação esquemática das aplicações na superfície inferior da plataforma de concreto



Fonte: elaborado pelo autor

Os dados foram registrados a cada minuto pela Unidade de aquisição e registro de dados Agilent-HP modelo 34970A, conectado a um

computador com o software Agilent BenchLink Data Logger para aquisição de dados.

3.1.3.1. Termopar tipo T

O termopar é constituído de dois metais distintos, cujas extremidades unidas formam um circuito fechado. A corrente elétrica gerada é diretamente relacionada à sua temperatura. Ao mantermos uma junção em temperatura diferente da outra, seus campos elétricos têm intensidades diferentes, o que resulta em força eletromotriz proporcional à diferença de temperatura entre as junções, chamado Efeito Seebeck.

Todos os termopares utilizados nesse experimento foram os chamados Termopares tipo T, feitos de cobre e constantan (Figura 33).

Figura 33 - Termopar tipo T utilizado na pesquisa

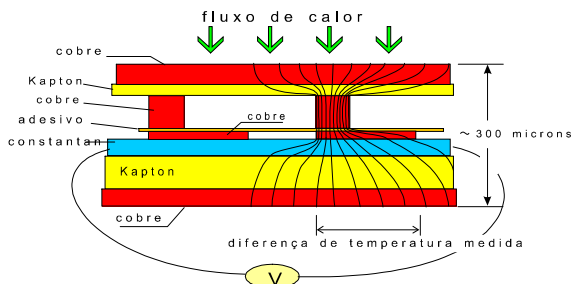


Fonte: acervo do autor - out. 2015

3.1.3.2. Transdutor de fluxo de calor

Neste projeto foi utilizado o transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial de 10x10 cm, produzido através de deposição eletrolítica de uma camada de cobre (metal que possui alta condutividade elétrica) sob uma camada de constantan (liga metálica que possui condutividade elétrica inferior ao cobre). Como pode ser visto na Figura 34, as camadas de metal são assimétricas, o que desvia o fluxo de calor dentro do transdutor e gera diferenças de temperatura, criando gradientes de calor, de modo que as diferenças de poder termoelétricos de cada material façam surgir força eletromotriz Seebeck. A força eletromotriz (f.e.m.) produz corrente elétrica em um circuito e age de maneira a anular a corrente de carga elétrica criada pela diferença de temperatura, o que faz do fluxo de calor e da f.e.m. proporcionais.

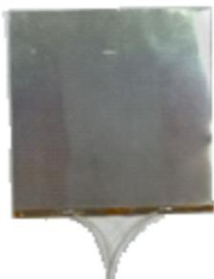
Figura 34: Princípio de funcionamento de um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial



Fonte: Güths e Nicolau, 1998

No exterior, o fluxímetro é revestido por uma lâmina de alumínio que, além de proteger o interior contra danos físicos, mantém a temperatura homogênea em sua superfície, o que faz com que o fluxo de calor atravesse o transdutor de maneira também homogênea (Figura 35).

Figura 35: Transdutor de fluxo de calor revestido por alumínio



Fonte: acervo do autor - abr. 2015

A precisão do transdutor depende da calibração do mesmo, pois o fluxo de calor é o produto entre a constante de calibração e a tensão medida pelo sensor. A calibração dos transdutores é apresentada no Apêndice A.

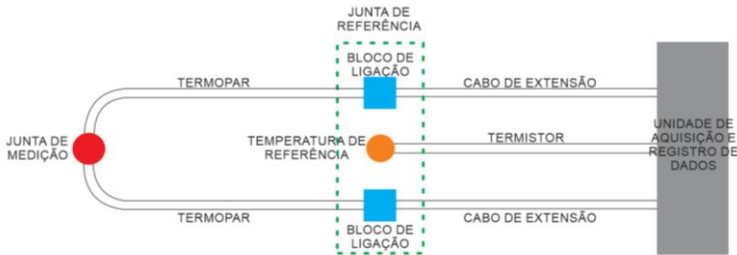
3.1.4. Junta de referência

Duas juntas de referência instaladas em cada lado no interior da bancada (lado fixo e lado móvel) permitiram conhecer a temperatura na junta de medição.

Cada termopar do tipo T teve uma das extremidades soldadas apoiadas sobre a superfície cuja temperatura era desconhecida (junta de medição) e a outra extremidade soldada em um cabo de rede de par trançado (cabo de extensão) ligado a Unidade de aquisição e registro de

dados. Todas as junções entre os termopares e os cabos de rede (bloco de ligação) foram inseridas na junta de referência. A temperatura na junta de referência foi medida por um termistor ligado diretamente a Unidade de aquisição e registro de dados (Figura 36).

Figura 36 - Sistema da junta de referência



Fonte: elaborado pelo autor

Esse procedimento foi necessário para encontrar a temperatura na superfície a ser medida (T). A Equação 2 apresenta valores tabelados para termopares tipo T correlacionados a tensão elétrica registrada e adicionados a temperatura conhecida da Junta de Referência.

$$\begin{aligned}
 T = & (0,025928 * V) - (7,60296 * 10^{-7} * V^2) \\
 & + (4,63779 * 10^{-11} * V^3) - (2,16539 * 10^{-15} * V^4) \\
 & + (6,04814 * 10^{-20} * V^5) - (7,29342 * 10^{-25} * V^6) + T_{jr} \quad [^{\circ}\text{C}]
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Onde:

T = Temperatura desconhecida ($^{\circ}\text{C}$)

V = Força eletromotriz Seebeck exercida pelo termopar (V)

T_{jr} = Temperatura da junta de referência ($^{\circ}\text{C}$)

As Juntas de Referência foram instaladas no interior da bancada experimental, de forma que a temperatura de referência era a igual a temperatura interna do aparato experimental.

A Figura 37 apresenta as etapas de execução da junta de referência. Um bloco de ligação entre os termopares tipo T e os cabos de extensão foi envolto em isolante lã de pet (Figura 37a). O bloco foi inserido em um tubo metálico, a fim de uniformizar a temperatura em todo o conjunto, e este, foi novamente envolto em isolante lã de pet (Figura 37b). O isolante tem por objetivo minimizar qualquer oscilação de temperatura interna. Por fim, todo o conjunto foi inserido em um tubo de PVC. (Figura 37c).

Figura 37 - Etapas de execução da junta de referência



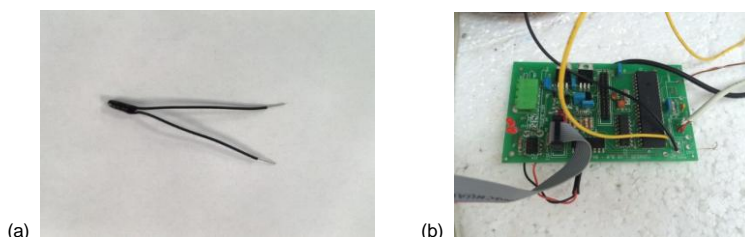
Fonte: acervo do autor - mar. 2015

3.1.5. Controle da temperatura interna através do controlador PID

Dois condicionadores de ar do tipo janela (um de 7500 BTU e outro de 9000 BTU) instalados no lado fixo da bancada mantiveram a temperatura interna constante através do controlador Proporcional Integral Derivativo - PID. Os equipamentos condicionadores de ar utilizados nessa pesquisa foram do tipo janela e apresentavam como padrão um controlador de temperatura do tipo *on/off*, ou seja, para manter a temperatura em um *setpoint* determinado, o equipamento ligava e desligava sempre que atingisse valores máximos e mínimos. Esse tipo de controle não é preciso.

Com o objetivo de reduzir as oscilações de temperatura interna, um termistor NTC-30K (Figura 38a) foi instalado na área central da câmara e ligado a um módulo calibrado a partir de um algoritmo de controle PID (Figura 38b). Na saída de ar de cada equipamento condicionador, um duto de alumínio foi equipado com uma resistência térmica, que era acionada pelo relé Fotek modelo SSR-40 DA ligado ao módulo calibrado, controlando a temperatura cujo *setpoint* foi fixado em 23,5°C.

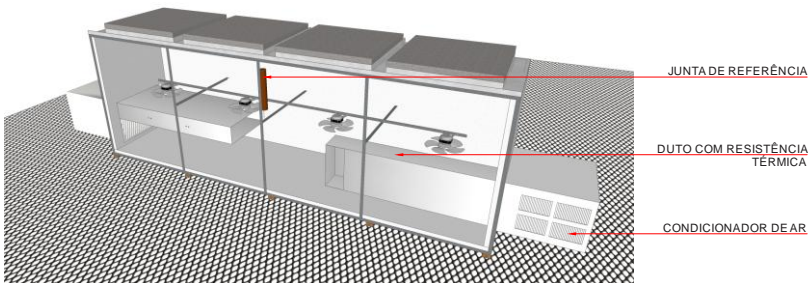
Figura 38 - Termistor NTC-30K (a) e módulo de controle (b)



Fonte: acervo do autor - ago. 2015

A Figura 39 apresenta esquematicamente os equipamentos instalados no lado fixo da bancada, entre eles os condicionadores de ar e os dutos de ventilação.

Figura 39 - Lado fixo da bancada



Fonte: elaborado pelo autor

O controlador PID é eficiente em um sistema como esse, chamado de Malha Fechada, pois o processo de leitura do termistor para ativar/desativar as resistências é constante. O controlador funciona ao estipular um valor desejado para a temperatura, chamado de *setpoint* e então, medir a temperatura real, considerando como erro a diferença de temperatura entre o valor medido e o *setpoint* (esse erro é definido como $e(t)$). O controlador procura minimizar o erro ao ajustar a temperatura utilizando os parâmetros PID.

O Apêndice B apresenta a calibração da bancada experimental, a partir dos parâmetros PID, equipada apenas com as plataformas de concreto (sem cobertura) a fim de garantir a confiabilidade do experimento.

3.1.6. Composições estruturais do telhado verde

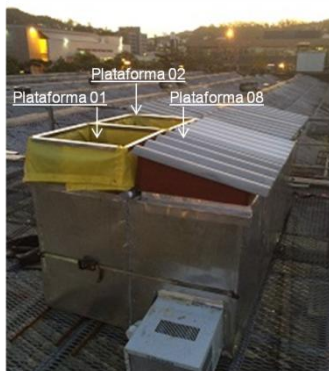
As etapas de medição para análise do comportamento térmico do telhado verde frente a diferentes composições ocorreram sequencialmente conforme apresentado na Tabela 3. Cada etapa apresentou uma variação física entre as amostras de telhado verde. As comparações com a cobertura de referência ocorreram quando pelo menos uma das amostras de cobertura vegetal recebeu plantas na composição, sendo então um sistema de cobertura completo. A Figura 40 apresenta a identificação de cada plataforma utilizada nessa pesquisa, sendo a Plataforma 08, de referência (com telha de fibrocimento 6 mm).

Tabela 3 - Etapas de medição com telhado verde

| VARIÁVEL | PLATAFORMA 01 | PLATAFORMA 02 | PLATAFORMA 08 |
|---|--|---|---|
| UMIDADE (Etapa 01) | Substrato seco com 10 cm de espessura | Substrato úmido com 10 cm de espessura | — |
| EPESSURA (Etapa 02) | Substrato úmido com 5 cm de espessura | Substrato úmido com 15 cm de espessura | — |
| VEGETAÇÃO (Etapa 03) | Substrato úmido com 10 cm de espessura + vegetação (grama Sempre Verde) | Substrato úmido com 10 cm de espessura | Telha de fibrocimento 6 mm de espessura |
| TIPO DE VEGETAÇÃO (Etapa 04) | Substrato úmido com 10 cm de espessura + vegetação (grama Sempre Verde) | Substrato úmido com 10 cm de espessura + vegetação (grama Preta) | Telha de fibrocimento 6 mm de espessura |
| ISOLAMENTO TÉRMICO (Etapa 05) | Substrato úmido com 10 cm de espessura + vegetação (grama Sempre Verde) + isolamento térmico | Substrato úmido com 10 cm de espessura + vegetação (grama Sempre Verde) | Telha de fibrocimento 6 mm de espessura |

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 40 - Identificação das plataformas de concreto sobre a bancada experimental

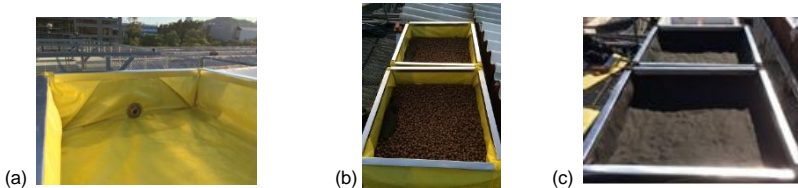


Fonte: acervo do autor - set. 2015

Para a estrutura base das amostras de telhado verde instalou-se o quadro de madeira para contenção das camadas, a lona como

impermeabilizante e o dreno do sistema, constituído por um flange de 25 mm (Figura 41a). A camada drenante foi constituída por 5 cm de espessura de argila expandida (Figura 41b). Por fim a manta geotêxtil (*Bidim*) foi aplicada em ambas plataformas (Figura 41c).

Figura 41 - Camadas comuns a todas as etapas de medição

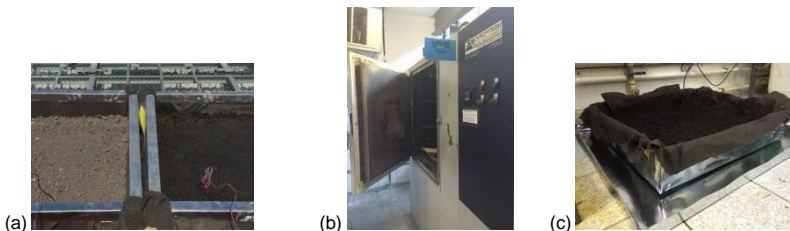


Fonte: acervo do autor - out. 2015

3.1.6.1. Etapa 01: variável umidade

A primeira etapa comparou os resultados a partir do parâmetro umidade. Os ensaios foram realizados apenas com a camada de substrato, onde uma amostra apresentou terra seca e outra, saturada (Figura 42a). Para a amostra seca (plataforma 01) adotou-se o método de secagem em estufa a temperatura de 105°C a 110°C até que se apresentasse constância de massa (Figura 42b). A terra úmida (plataforma 02) foi saturada por ascensão capilar. O substrato, armazenado em uma bandeja de alumínio com fundo perfurado, foi inserido dentro de outra bandeja com uma lâmina de água (Figura 42c). As plataformas foram preenchidas com a mesma espessura de substrato (10 cm). Os dados registrados nessa etapa foram fluxo de calor e temperatura na superfície superior do componente estrutural e temperatura na superfície superior do substrato.

Figura 42 - Substrato seco e úmido (a), estufa para secagem da terra (b); e processo de saturação da terra



Fonte: acervo do autor - abr. 2016

3.1.6.2. Etapa 02: variável espessura

A etapa seguinte comparou os resultados a partir do parâmetro inércia, portanto cada amostra apresentou diferentes espessuras de solo, considerando os limites para telhado verde extensivo (Figura 43a). A plataforma 01 foi preenchida com 5 cm de substrato (Figura 43b) e a plataforma 2, com 15 cm de substrato (Figura 43c). Ambas amostras estavam com o substrato de terra úmido por ser esta a condição comum em coberturas vegetais. Além dos transdutores de fluxo de calor e termopares instalados nas superfícies da laje de concreto, também foram registrados dados de temperatura na superfície superior do substrato (o termopar ficou embaixo de uma fina camada de terra).

Figura 43 - Substrato com espessura de 5 cm e 15 cm



Fonte: acervo do autor - jan. 2016

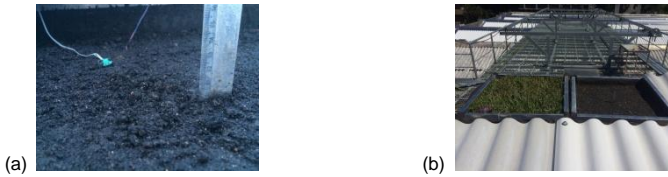
3.1.6.3. Etapas 03 e 04: variável vegetação e tipo de vegetação

Da terceira etapa em diante as amostras de telhado verde foram montadas com a mesma espessura de solo, igual a 10 cm (Figura 44a). Essa medida foi adotada por ser intermediária aos limites para telhado verde do tipo extensivo, que varia de 5 cm a 15 cm (PARIZOTTO FILHO, 2010; TABARES-VELASCO; SREBRIC, 2012).

A terceira etapa do trabalho apresentou como variável a vegetação. Enquanto a plataforma 02 se manteve com o substrato exposto, a plataforma 01 foi coberta com grama Sempre Verde - *Axonopus compressus* (Figura 44b). A etapa seguinte apresentou vegetação em ambas amostras (Figura 45a), porém de tipos diferentes; a plataforma 02 foi coberta com grama Preta - *Ophiopogon japonicus*. Os parâmetros da vegetação variam de acordo com a espécie (densidade das folhas, taxa de evapotranspiração, área de sombreamento, etc.) e podem apresentar variações também no resultado (Figura 45b).

Além dos sensores já utilizados na etapa anterior para registro de dados de temperatura e fluxo de calor, nestas duas iniciou-se o registro da temperatura do ar no dossel das plantas.

Figura 44 - Substrato com 10cm de espessura (a) com e sem vegetação (b)



Fonte: acervo do autor - fev. 2016

Figura 45 - Substratos com vegetação diferente (a) e detalhe (b) – grama Sempre Verde (esquerda) e grama Preta (direita)

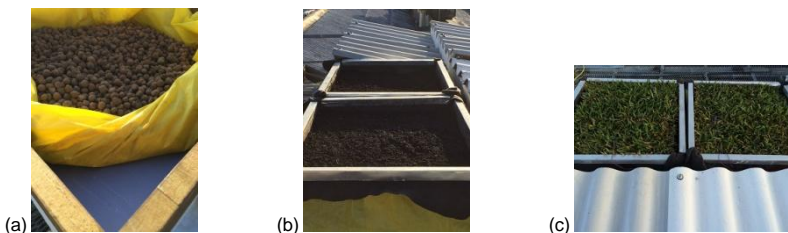


Fonte: acervo do autor - mar. 2016

3.1.6.4. Etapa 05: variável isolamento térmico

A última etapa comparou as amostras de telhado verde completas (impermeabilização, camada drenante, manta geotêxtil, substrato e vegetação) com adição de isolamento térmico poliestireno extrudado - XPS 25 mm na plataforma 01, entre o componente estrutural e a impermeabilização (Figura 46). A vegetação adotada foi do tipo gramínea (grama Sempre Verde) por ser uma solução economicamente viável e de fácil aplicação prática.

Figura 46 - Isolamento térmico XPS sob impermeabilização e camada drenante (a); substrato úmido (b); grama Sempre Verde (c)



Fonte: acervo do autor - mai. 2016

Na literatura revisada, alguns autores adotaram o isolante térmico como parte do componente estrutural, entre as camadas de

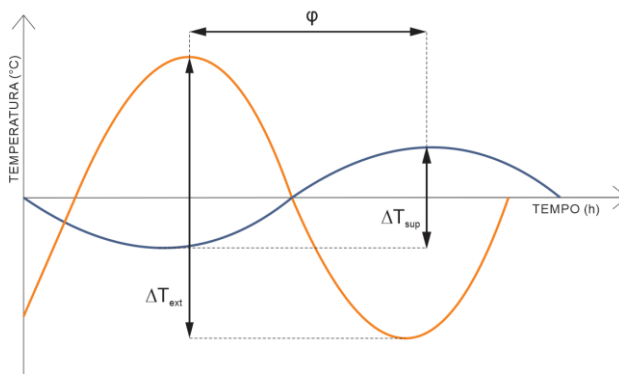
impermeabilização e de regularização: Parizotto Filho (2010) utilizou isolante térmico poliestireno extrudado 20 mm - XPS (Figura 22b); Jim (2015) adotou uma camada de espuma de poliestireno (40 mm); Jim e He (2010) utilizaram isolamento térmico (Figura 12), entretanto como não houve medição abaixo da laje de concreto, não há especificação de material e espessura.

3.2. PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO TÉRMICO: FATOR DECREMENTAL, ATRASO TÉRMICO E RESISTÊNCIA TÉRMICA EM DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE TELHADO VERDE

Os parâmetros adotados para avaliar o comportamento térmico do telhado verde foram atraso térmico (ψ) e fator decremental ou amortecimento (f). Esses parâmetros estão associados a inércia térmica (característica do telhado verde). O fator decremental é a razão entre a amplitude de temperatura na superfície interna de contato e a amplitude externa (Equação 3). Já o atraso térmico se caracteriza pelo intervalo de tempo entre a hora da temperatura máxima na superfície interna de contato e a hora da temperatura máxima do ambiente externo (Equação 4) (Figura 47).

Esses parâmetros foram aplicados em cada etapa de medição mencionada no item 3.1.6 como método de avaliação do comportamento térmico, através da capacidade de armazenamento de calor.

Figura 47 - Parâmetros atraso térmico e fator decremental



Fonte: elaborado pelo autor

$$f = \frac{T_{sup\ máx} - T_{sup\ mín}}{T_{ext\ máx} - T_{ext\ mín}} \quad (3)$$

Onde:

f = Fator decremental

$T_{sup\ máx}$ = Temperatura máxima na superfície interna de contato (°C)

$T_{sup\ mín}$ = Temperatura mínima na superfície interna de contato (°C)

$T_{ext\ máx}$ = Temperatura máxima no ambiente externo (°C)

$T_{ext\ mín}$ = Temperatura mínima no ambiente externo (°C)

$$\varphi = t_{T\ sup\ máx} - t_{T\ ext\ máx} \quad (4)$$

Onde:

φ = Atraso térmico

$t_{T\ sup\ máx}$ = Hora em que ocorre a temperatura máxima na superfície interna de contato (h)

$t_{T\ ext\ máx}$ = Hora em que ocorre a temperatura máxima no ambiente externo (h)

Além destes parâmetros, na última etapa de medição, cuja variável foi isolamento térmico, foi calculada a resistência térmica (Equação 5) na superfície de contato superior do componente estrutural das amostras de telhado verde, conforme sugere D'Orazio, Di Pierna, Di Giuseppe (2012).

$$R_t = \frac{\sum_{j=1}^n T_{sij} - T_{ej}}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (5)$$

Onde:

R_t = Resistência térmica na superfície de contato superior (m²K/W)

T_{sij} = Temperatura incidente na superfície (K)

T_{ej} = Temperatura do ar externo (K)

q_j = Fluxo de calor (W/m²)

Para o cálculo da resistência térmica total (Equação 7) somou-se a resistência da laje de concreto (Equação 6) e a resistência superficial interna, conforme método de cálculo apresentado pela ANBT NBR 15.220-2 (2005a). A resistência superficial externa não foi considerada no cálculo da resistência térmica total das amostras de telhado verde pois, no cálculo da resistência na superfície de contato superior, foi considerada a temperatura do ar externo.

$$R_{conc} = \frac{e}{\lambda} \quad (6)$$

Onde:

R_{conc} = Resistência térmica da laje de concreto (m²K/W)

e = Espessura da laje de concreto (m)

λ = Condutividade térmica do concreto (W/mK)

$$R_T = R_t + R_{conc} + R_{si} \quad (7)$$

Onde:

R_T = Resistência térmica total (m^2K/W)

R_t = Resistência térmica até superfície de contato (m^2K/W)

R_{conc} = Resistência térmica da laje de concreto (m^2K/W)

R_{si} = Resistência superficial interna (m^2K/W)

A resistência térmica da cobertura de referência foi calculada de acordo com a ABNT NBR 15.220-2 (2005a). A Equação 8 apresenta o cálculo da resistência térmica de superfície a superfície e a Equação 9, a resistência térmica de ambiente a ambiente.

$$R_t = R_{telha} + R_{ar} + R_{conc} \quad (8)$$

Onde:

R_t = Resistência térmica de superfície a superfície (m^2K/W)

R_{telha} = Resistência térmica da telha (m^2K/W)

R_{ar} = Resistência térmica da camada de ar (m^2K/W)

R_{conc} = Resistência térmica da laje de concreto (m^2K/W)

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (9)$$

Onde:

R_T = Resistência térmica total (m^2K/W)

R_{se} = Resistência superficial externa (m^2K/W)

R_t = Resistência térmica de superfície a superfície (m^2K/W)

R_{si} = Resistência superficial interna (m^2K/W)

Conhecidas todas as resistências térmicas, foi calculada a transmitância térmica (Equação 10) das três coberturas, conforme método de cálculo apresentado pela ABNT NBR 15.220-3 (2005b).

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (10)$$

Onde:

U = Transmitância térmica (W/m^2K)

R_T = Resistência térmica total (m^2K/W)

Esse procedimento teve por objetivo comparar o desempenho térmico das amostras de telhado verde, com e sem camada de isolamento térmico XPS, e da cobertura com telha de fibrocimento, através dos dados medidos de fluxo de calor na superfície de contato superior do componente estrutural. O valor de transmitância térmica encontrado foi confrontado com os valores sugeridos pelas normas, regulamentos e certificações vigentes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados de fluxo de calor na superfície de contato superior da laje de concreto (plataforma 01 – Plt. 01, plataforma 02 – Plt. 02 e plataforma 08 – Plt. 08) foram analisados e comparados com as condições climáticas (umidade relativa do ar, radiação solar incidente e temperatura do ar externo). A Tabela 4 apresenta os dados de todas as etapas de medição. A coleta de dados de cada etapa teve duração de cinco dias. A primeira etapa ocorreu entre os dias 16 e 21/04 (sendo que no dia 19 não houve medição), a segunda, nos dias 12 a 16/02, a terceira, entre os dias 11 e 15/03, a quarta etapa ocorreu nos dias 18 a 22/03 e a última etapa, entre os dias 11 e 15/05.

Tabela 4 - Dados climáticos e dados medidos (temperatura e fluxo de calor superficiais) em todas as etapas de medição

| | Data | UR do ar mín. (%) | Rad. solar máx. (W/m ²) | Temp máx. do ar (°C) | Temperatura máx. na superfície de contato superior da laje (°C) | | | Fluxo de calor máx. na superfície de contato superior da laje (W/m ²) | | |
|----------|-------|-------------------|-------------------------------------|----------------------|---|---------|---------|---|---------|---------|
| | | | | | Plt. 01 | Plt. 02 | Plt. 08 | Plt. 01 | Plt. 02 | Plt. 08 |
| Etapa 01 | 16/04 | 65,6 | 777 | 34,74 | 30,07 | 29,67 | -- | 32,48 | 25,43 | -- |
| | 17/04 | 68,4 | 861 | 33,04 | 27,35 | 27,40 | -- | 30,19 | 24,64 | -- |
| | 18/04 | 48,6 | 815 | 39,23 | 28,16 | 28,16 | -- | 34,44 | 30,41 | -- |
| | 20/04 | 44,8 | 777,6 | 37,73 | 30,10 | 29,43 | -- | 31,91 | 25,69 | -- |
| | 21/04 | 59,8 | 775,2 | 34,47 | 27,19 | 27,11 | -- | 29,50 | 26,35 | -- |
| Etapa 02 | 12/02 | 51,5 | 1272 | 34,97 | 28,40 | 27,02 | -- | 40,63 | 23,07 | -- |
| | 13/02 | 50,3 | 1069 | 34,74 | 28,55 | 26,74 | -- | 47,36 | 19,45 | -- |
| | 14/02 | 52,8 | 1144 | 36,97 | 28,88 | 26,86 | -- | 51,53 | 21,71 | -- |
| | 15/02 | 60,3 | 1298 | 33,19 | 26,67 | 25,87 | -- | 39,90 | 15,63 | -- |
| | 16/02 | 72,8 | 967 | 31,14 | 26,27 | 25,23 | -- | 27,71 | 12,28 | -- |
| Etapa 03 | 11/03 | 60,1 | 1375 | 30,20 | 24,03 | 24,89 | 28,24 | 9,11 | 20,25 | 54,05 |
| | 12/03 | 54,6 | 1411 | 28,73 | 23,44 | 23,96 | 28,40 | 6,20 | 13,67 | 43,38 |
| | 13/03 | 52,7 | 1136 | 28,59 | 23,09 | 23,73 | 27,76 | 1,81 | 10,45 | 35,95 |
| | 14/03 | 69,4 | 826 | 27,41 | 23,13 | 23,59 | 25,83 | 2,94 | 5,77 | 14,92 |
| | 15/03 | 60,6 | 1217 | 31,71 | 24,39 | 25,63 | 30,59 | 11,35 | 23,10 | 48,16 |
| Etapa 04 | 18/03 | 53,9 | 992 | 35,08 | 25,66 | 25,25 | 31,55 | 15,99 | 8,30 | 66,04 |
| | 19/03 | 59,8 | 1181 | 32,04 | 25,06 | 24,83 | 29,70 | 11,08 | 5,17 | 48,53 |
| | 20/03 | 67,7 | 1016 | 30,93 | 24,55 | 24,45 | 28,00 | 10,34 | 5,04 | 36,51 |
| | 21/03 | 60,3 | 1184 | 33,69 | 24,74 | 24,66 | 28,36 | 11,51 | 5,47 | 46,61 |
| | 22/03 | 46,4 | 1074 | 36,63 | 24,91 | 24,65 | 31,22 | 12,49 | 5,47 | 63,39 |
| Etapa 05 | 11/05 | 57,6 | 1010 | 26,36 | 24,47 | 24,35 | 27,97 | -0,22 | -0,78 | 55,45 |
| | 12/05 | 64,4 | 843 | 21,75 | 23,74 | 23,56 | 24,58 | -1,60 | -4,58 | 24,64 |
| | 13/05 | 53,8 | 915 | 24,56 | 23,93 | 23,78 | 26,38 | -1,14 | -2,09 | 42,60 |
| | 14/05 | 68,7 | 688,8 | 23,86 | 24,17 | 24,12 | 24,93 | -0,57 | -1,31 | 23,99 |
| | 15/05 | -- | -- | 25,38 | 24,09 | 23,86 | 24,35 | -0,91 | -3,27 | 26,74 |

Fonte: elaborado pelo autor

A primeira etapa não ocorreu na ordem cronológica conforme as demais devido a ajustes realizados na bancada. Na última etapa, os dados climáticos registrados pela estação meteorológica do LEPTEN apresentaram falha no último dia de medição, não estando disponíveis na base de dados.

4.1. ETAPA 01: VARIÁVEL UMIDADE

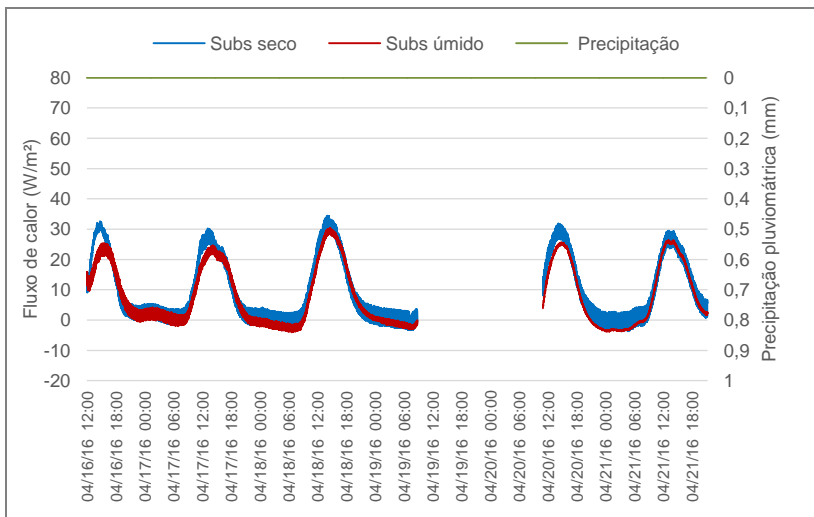
A primeira etapa de medição comparou dados entre duas amostras com a mesma espessura de substrato (10 cm), sendo uma seca e outra úmida.

Analisando o Gráfico 1 observa-se que as curvas de fluxo de calor se aproximam com o passar do tempo, possivelmente porque a amostra seca tende a absorver umidade do ar e a amostra úmida tende a secar por causa da evaporação da água. Não houve registro de precipitação no período.

O ganho de calor máximo na superfície superior do componente estrutural foi registrado no dia 18/04/16 (chegando a $34,44 \text{ W/m}^2$ na amostra de substrato seco e $30,42 \text{ W/m}^2$ na amostra de substrato úmido), mesmo dia em que a temperatura do ar externo foi maior (Gráfico 3). A amostra com substrato úmido apresentou redução média no ganho de calor de 16% em relação a amostra com substrato seco. A amplitude observada foi, em média, 12,8% menor na mesma comparação.

Calculando a integral de cada curva de fluxo de calor, temos que a amostra com substrato seco apresentou fluxo de calor negativo na superfície de contato superior da laje de concreto durante 11,3% do tempo, sendo que apenas 1,7% do fluxo total foi de saída. A amostra com terra úmida apresentou fluxo negativo em 23,8% do tempo, sendo que o fluxo de saída representa 5,8% do total para o período.

Gráfico 1 - Fluxo de calor na superfície de contato superior do componente estrutural e precipitação - substrato seco e úmido

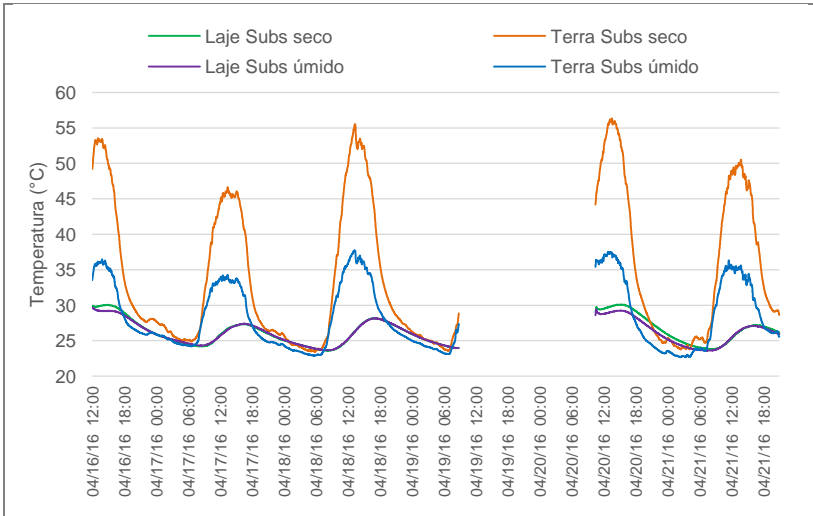


Fonte: elaborado pelo autor

A diferença entre as temperaturas máximas e médias na superfície de contato superior do componente estrutural foi de no máximo 0,67°C e 0,79°C, respectivamente, no dia 20/04/16. Já a diferença entre temperaturas na superfície do substrato foi mais expressiva. A amostra com substrato úmido apresentou temperatura média de até 8,63°C menor, no dia 20/04/16, em comparação com a amostra com substrato seco (Gráfico 2).

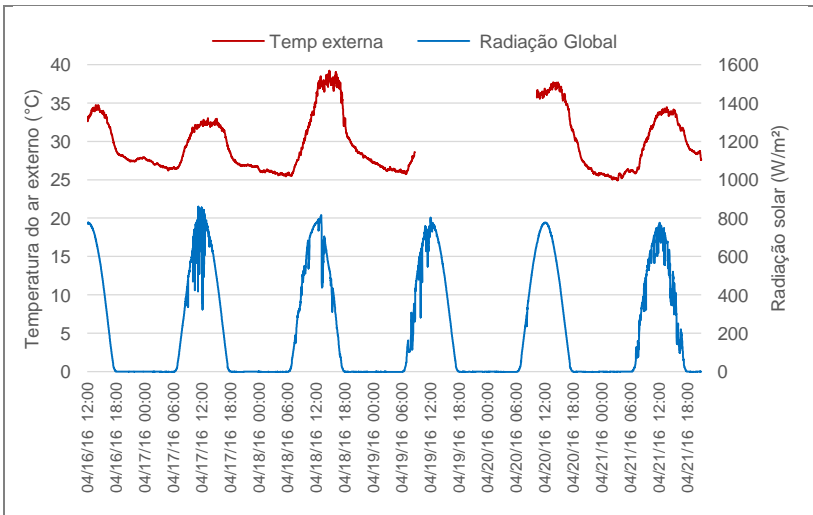
Comparando a diferença média para os cinco dias de medição entre a temperatura média da superfície do substrato e a temperatura média da superfície da laje para as amostras de substrato seco e úmido, tem-se 7,92°C e 2,40°C, respectivamente. Essa diferença é resultado da alta temperatura registrada na superfície do substrato seco. A temperatura média do ar externo no período analisado foi de 30,18°C.

Gráfico 2 - Temperatura na superfície de contato superior do componente estrutural, na superfície do substrato de terra e no dossel das plantas - substrato seco e úmido



Fonte: elaborado pelo autor

Gráfico 3 - Radiação solar e temperatura do ar externo - substrato seco e úmido



Fonte: elaborado pelo autor

4.2. ETAPA 02: VARIÁVEL ESPESSURA

Na segunda etapa de medições, as plataformas 01 e 02 foram preenchidas com 5 cm e 15 cm de substrato úmido, respectivamente.

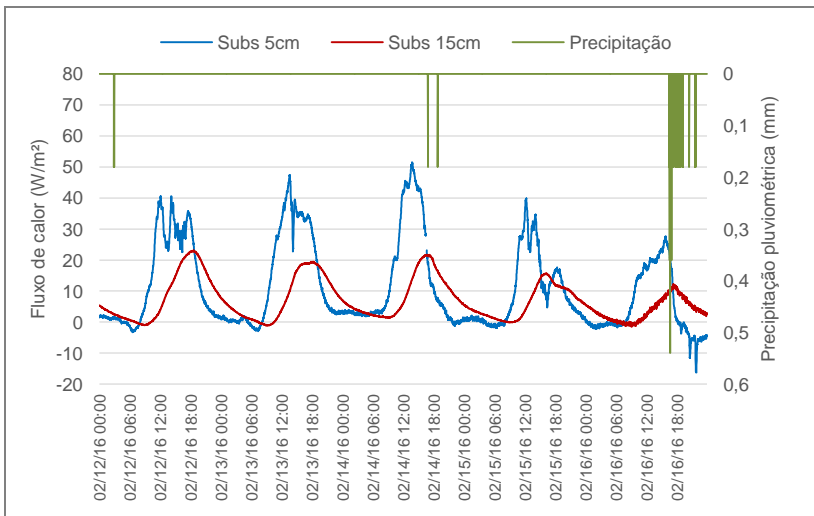
No Gráfico 4 observa-se que a plataforma 02, com 15 cm de substrato, apresenta amplitudes de fluxo de calor 59,4% menores, em média, em relação a amostra com 5 cm de substrato. O fluxo de calor máximo foi, em média, 55% menor na mesma comparação, ocorrendo com atraso médio de 3,96 horas. A maior redução ocorreu no dia 14/02/16, quando a temperatura do ar externo foi maior (Gráfico 6). Nesse dia, o fluxo de calor máximo na superfície do componente estrutural foi de 51,53 W/m² para a amostra com 5 cm de substrato e 21,71 W/m² para a amostra com 15 cm de substrato. O amortecimento e atraso térmicos observados configuram o substrato como elemento de elevada inércia térmica.

O evento de chuva observado no dia 16/02 reduziu rapidamente o fluxo de calor na superfície de contato da amostras com 5 cm de substrato. A amostra com menor massa permite o rápido resfriamento das camadas, reduzindo o fluxo de calor. Na amostra com maior massa, o efeito não foi observado.

A amostra com 5 cm de substrato retirou calor da laje em 20% do tempo, sendo que apenas 3,3% do fluxo de calor total foi de saída. A amostra com 15 cm de terra apresentou fluxo negativo em 8,2% do tempo, sendo que o fluxo de saída representou apenas 0,7% do total. A amostra com menor espessura de substrato responde mais rapidamente as condições climáticas externas, permitindo que o fluxo de calor de saída ocorresse por tempo maior, acompanhando a tendência da temperatura do ar externo, por exemplo.

O comportamento das duas amostras, quando analisado tanto a taxa de calor transferido (Gráfico 4) quanto as temperaturas superficiais (Gráfico 5), acompanhou o comportamento da temperatura do ar externo, sendo maior nos três primeiros dias de medição e menor dos dois dias seguintes.

Gráfico 4- Fluxo de calor na superfície de contato superior do componente estrutural e precipitação - substrato 5 cm e 15 cm de espessura

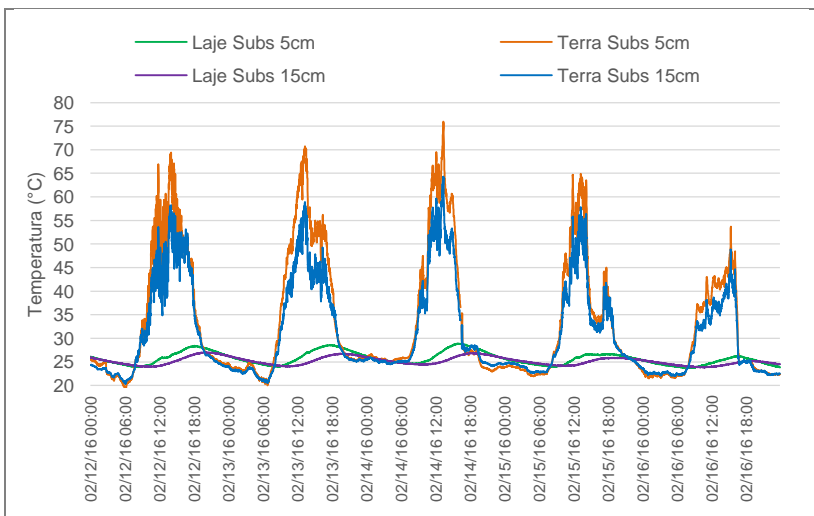


Fonte: elaborado pelo autor

A diferença entre as temperaturas máximas e médias na superfície de contato superior do componente estrutural chegou a 2,02°C e 0,81°C, respectivamente, no dia 14/02/16. Na superfície do substrato, a maior diferença entre as temperaturas médias foi registrada no dia 13/02/16, sendo 3,60°C maior na amostra com 5 cm de substrato, em comparação com a amostra com 15 cm de substrato.

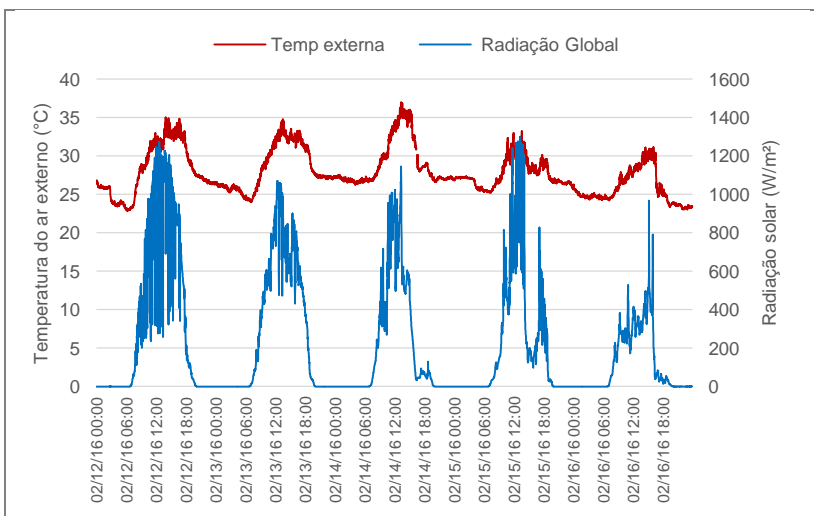
Comparando a diferença média para os cinco dias de medição entre a temperatura média da superfície de contato e a temperatura média do substrato para as amostras com 5 cm e 15 cm de substrato, tem-se 7,39°C e 5,74°C, respectivamente. A amostra com 5 cm de substrato apresenta maior diferença entre as temperaturas devido a maior temperatura registrada na superfície superior da camada de substrato. A temperatura média do ar externo no período analisado foi de 27,78°C.

Gráfico 5 - Temperatura na superfície de contato superior do componente estrutural e na superfície do substrato de terra - substrato 5 cm e 15 cm de espessura



Fonte: elaborado pelo autor

Gráfico 6 - Radiação solar e temperatura do ar externo - substrato 5 cm e 15 cm de espessura



Fonte: elaborado pelo autor

4.3. ETAPA 03: VARIÁVEL VEGETAÇÃO

A terceira etapa de medição comparou as amostras de telhado verde com a mesma espessura de substrato (10 cm), sendo que a plataforma 01 recebeu uma camada vegetal (grama Sempre Verde) enquanto que a plataforma 02 ficou sem vegetação. Os resultados foram comparados a uma cobertura de referência, com telha de fibrocimento de 6 mm de espessura.

O Gráfico 7 mostra as curvas de fluxo de calor medidos na superfície de contato superior da laje de concreto nas duas amostras de telhado verde e na cobertura de referência. A diferença entre o ganho de calor máximo registrado na superfície de contato superior do componente estrutural das amostras de telhado verde com e sem vegetação foi em média de 84,1% e 63% respectivamente, em comparação com a cobertura de referência. O percentual máximo foi encontrada no dia 13/03/16, quando a umidade relativa do ar registrada foi menor.

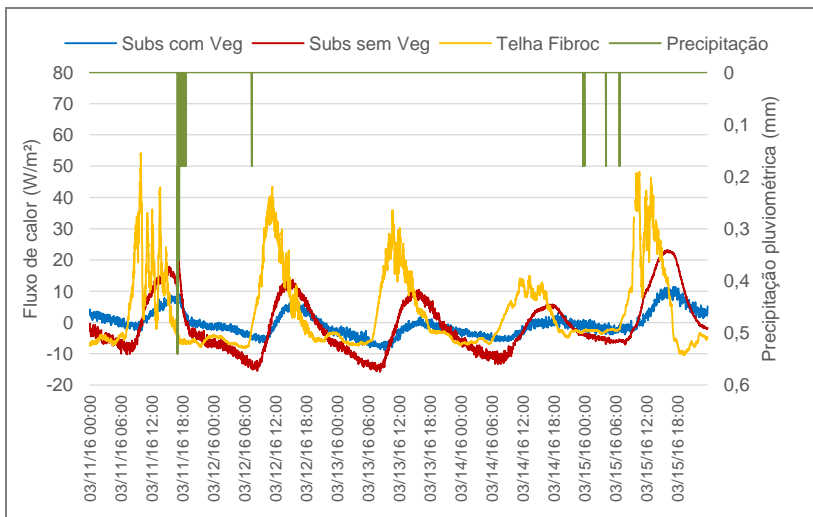
O fluxo de calor máximo na amostra sem vegetação foi, em média, 58,4% maior em relação a amostra com vegetação.

Analisando os dados da Tabela 4, observa-se que a temperatura e o fluxo de calor máximos das amostras sofreram oscilações que acompanharam a temperatura máxima do ar externo, sendo maior no dia 15 e menor no dia 14, com exceção da plataforma 01 (com vegetação), onde os dados máximos registrados de fluxo de calor e temperatura foram menores no dia 13, quando a umidade relativa do ar foi menor. Possivelmente esse fato foi observado pois, estando o ar mais seco, o efeito da evapotranspiração foi potencializado, reduzindo o ganho de calor. Além disso, a presença da vegetação reduziu a amplitude do fluxo de calor em 73,1% em média, quando comparado com a cobertura de referência. Para a amostra sem vegetação essa redução foi de 39,3% em média.

A precipitação não apresentou impacto nos resultados, talvez por ter ocorrido em um volume baixo ou durante a noite, quando não havia radiação incidente para que a evapotranspiração tivesse efeito potencializado.

Para a cobertura de referência, telhado verde com e sem vegetação, o fluxo de calor foi negativo em 59,5%, 60,8% e 61,7% do tempo, respectivamente, durante o período em que houve registro de dados. O fluxo de calor de saída representou 32,3%, 56,5% e 55,7%, respectivamente, do total de calor transferido (Gráfico 7).

Gráfico 7 - Fluxo de calor na superfície de contato superior do componente estrutural e precipitação - substrato com e sem vegetação



Fonte: elaborado pelo autor

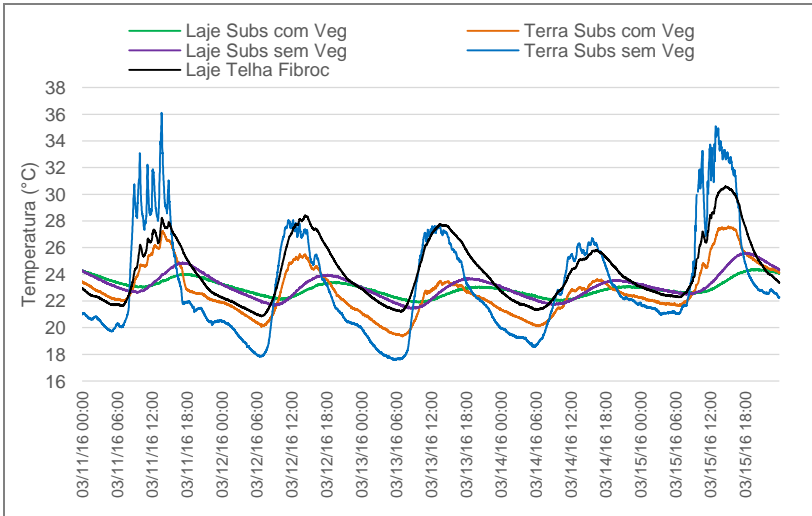
A diferença entre as temperaturas máximas na superfície de contato superior da laje de concreto das amostras de telhado verde com e sem vegetação, em comparação com a cobertura de referência foi de no máximo 6,20°C e 4,96°C respectivamente, no dia 15/03/16 (Gráfico 8). A mesma comparação entre as temperaturas médias na superfície superior de contato do componente estrutural mostra que a diferença máxima registrada foi de 2,02°C entre a amostra com vegetação e a cobertura de referência e 1,53°C entre a amostra sem vegetação e a cobertura de referência. Entre as amostras de telhado verde, essa diferença chegou a 0,49°C.

A diferença entre a temperatura média do substrato das amostras de telhado verde com e sem vegetação foi 0,39°C, em média, para o período analisado. Considerando as temperaturas de pico essa diferença foi de 5,25°C. As maiores diferenças foram registradas nos dias 11 e 15/03/16, quando a temperatura do ar externo também foi maior (Gráfico 9). Possivelmente esse resultado foi observado devido ao sombreamento da vegetação sobre o substrato, reduzindo as temperaturas na camada, enquanto que na amostra sem vegetação o substrato ficou exposto, elevando a temperatura registrada.

Comparando a diferença média, para os cinco dias de medição, entre a temperatura média do substrato e a temperatura média da superfície de contato para as amostras com e sem vegetação, observa-se valores negativos (-0,23°C e -0,02°C para amostras com e sem vegetação, respectivamente). A temperatura média no substrato era menor do que a

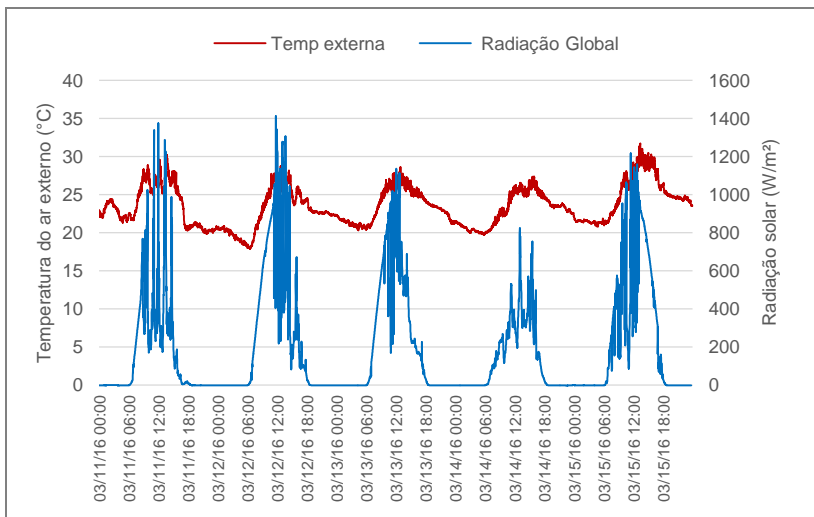
temperatura média na superfície superior da laje de concreto, possivelmente porque a temperatura média do ar externo no período analisado foi baixa se comparado as temperaturas médias das Etapas de medição 01, 02 e 04 (23,47°C).

Gráfico 8 - Temperatura na superfície de contato superior do componente estrutural e na superfície do substrato de terra - substrato com e sem vegetação



Fonte: elaborado pelo autor

Gráfico 9 - Radiação solar e temperatura do ar externo - substrato com e sem vegetação



Fonte: elaborado pelo autor

4.4. ETAPA 04: VARIÁVEL TIPO DE VEGETAÇÃO

Para a quarta etapa de medição foi acrescentada camada vegetal (grama Preta) sobre a plataforma 02. A plataforma 01 foi mantida com grama Sempre Verde, como na Etapa 03. Os resultados das duas amostras de telhado verde foram comparados a uma cobertura de referência, com telha de fibrocimento.

O Gráfico 10 mostra as curvas de fluxo de calor medidos na superfície de contato superior do componente estrutural nas duas amostras de telhado verde e na cobertura de referência. A diferença entre o fluxo de calor máximo registrado na superfície de contato das amostras de telhado verde com diferentes camadas vegetais foi em média de 76% e 88,5% para grama Sempre Verde e grama Preta, respectivamente, em comparação com a cobertura de referência. O percentual máximo foi encontrado no dia 22/03/16, quando a umidade relativa do ar registrada foi menor e a temperatura do ar externo foi maior. Nesse dia o fluxo de calor máximo registrado para a cobertura com telha de fibrocimento foi de 63,39 W/m² enquanto que para as amostras de telhado verde esse fluxo foi de 12,49 Wm² para a grama Sempre Verde e 5,47 W/m² para a grama Preta.

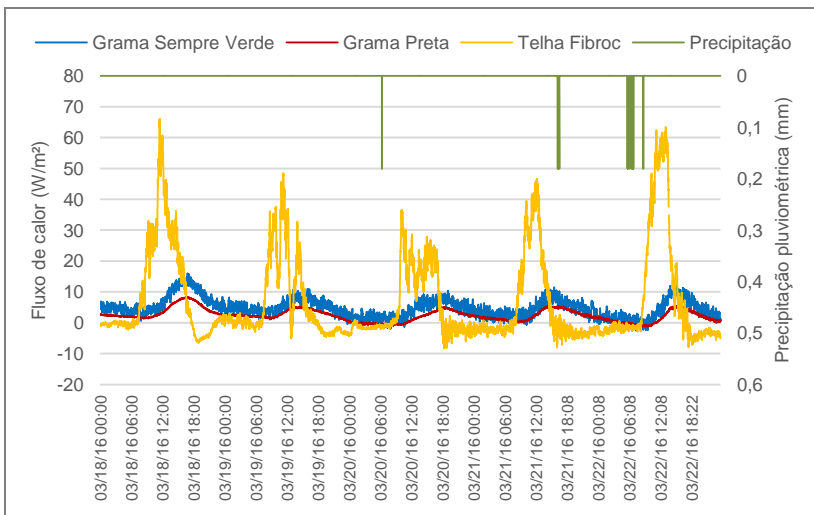
A diferença no fluxo de calor máximo entre as amostras de telhado verde também foi alta. A amostra com grama Preta apresentou fluxo 52,2% menor, em média, em relação a amostra com grama Sempre Verde.

O tipo de vegetação adotada pode representar diferenças na amplitude do fluxo de calor, como pode se observar no Gráfico 10. Em comparação com a cobertura de referência, a amostra com grama Sempre Verde reduziu a amplitude, em média, em 77,1%, enquanto que a comparação com a amostra com grama Preta reduziu em 89,7% na média. Como a grama Preta possibilita maior sombreamento do substrato, devido a sua configuração física, possivelmente esse motivo tem impacto no resultado apresentado.

Analisando a integral das curvas de fluxo de calor para a cobertura de referência, telhado verde com grama Sempre Verde e com Grama Preta, o fluxo de calor foi negativo em 13,6%, 1,5% e 2,5% respectivamente, representando 52%, 6,6% e 12,8% do tempo durante todo o período em que houve coleta de dados.

Comparando os dados da grama Sempre Verde com os dados da medição anterior (variável vegetação), onde a plataforma 01 possuía o mesmo tipo de vegetação, observa-se que a Etapa 04 apresenta fluxos negativos em uma proporção bem menor. Comparando-se os dados climáticos registrados nessas duas últimas etapas de medição, observa-se que nas medições cuja variável foi o tipo de vegetação (Etapa 03), a temperatura do ar externo apresentou máximas mais elevadas e a radiação solar apresentou máximas mais baixas, na média. Com temperaturas mais elevadas, a quantidade de calor armazenado na camada de substrato é maior, possivelmente reduzindo a capacidade de perda de calor da laje de concreto.

Gráfico 10 - Fluxo de calor na superfície de contato superior do componente estrutural e precipitação - substrato com vegetação de tipos diferente



Fonte: elaborado pelo autor

O Gráfico 11 apresenta as curvas para temperaturas na superfície da laje de concreto, substrato e ar no dossel das plantas. A diferença entre as temperaturas máximas na superfície de contato das amostras de telhado verde com grama Sempre Verde e grama Preta, em comparação com a cobertura de referência foi de no máximo 6,31°C e 6,57°C, respectivamente, no dia 22/03/16. A mesma comparação entre as temperaturas médias na superfície superior de contato do componente estrutural mostra que a diferença máxima registrada entre a amostra com grama Sempre Verde e a cobertura com telha de fibrocimento foi de 1,72°C, e entre a amostra com grama Preta e a cobertura de referência foi de 1,95°C. Entre as amostras de telhado verde, essa diferença chegou a 0,22°C.

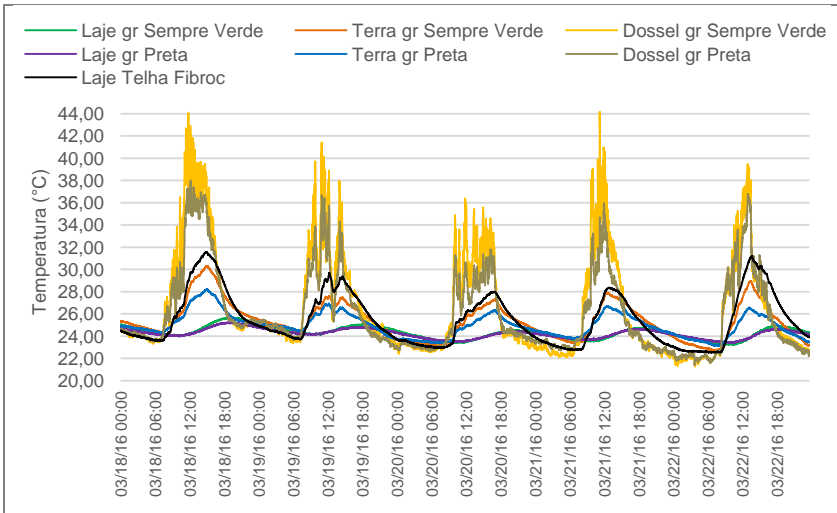
A diferença entre a temperatura média do dossel das amostras de telhado verde com grama Sempre Verde e grama Preta foi 0,58°C, em média, para o período analisado. Considerando as temperaturas de pico essa diferença foi de 5,26°C. A maior diferença de temperatura do dossel foi registrada no dia 21/03/16, quando a radiação solar registrada foi máxima para o período.

A amostra de telhado verde com grama Preta também apresentou temperaturas inferiores na camada de substrato, em comparação com a amostra com grama Sempre Verde. Para temperatura média a diferença foi de 0,39°C no período analisado, enquanto que para temperaturas de pico a diferença média foi de 1,47°C. A maior diferença foi registrada no dia 22/03/16, quando a temperatura do ar externo também foi maior (Gráfico 12). A mesma correlação entre as temperaturas do substrato e do ar externo foi observada na etapa de medição anterior (variável vegetação).

Comparando a diferença média, para os cinco dias de medição, entre a temperatura média do ar no dossel e a temperatura média na superfície de contato para as amostras com grama Sempre Verde e Preta tem-se 2,28°C e 1,79°C, respectivamente. A redução apresentada pela amostra com grama Preta foi menor pois a temperatura no dossel já era 0,58°C menor do que no dossel da amostra com grama Sempre Verde enquanto que na superfície superior do componente estrutural das duas amostras a diferença era de apenas 0,08°C. A temperatura média do ar externo no período analisado foi de 26,95°C.

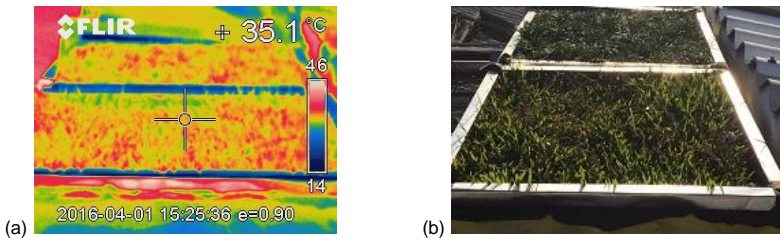
O registro termográfico realizado com a câmera ThermaCAM E25 é mostrado na Figura 48, onde se observa a distribuição da temperatura nas folhas das duas amostras de telhado verde. Para a captura da imagem foi selecionado emissividade igual a 0,90. Segundo Tabares-Velasco e Srebric (2012) a faixa de emissividade para grama varia de 0,90 a 0,97. Pela imagem, pode-se observar que a distribuição da temperatura nas duas superfícies não foi uniforme. Essa variação pode ser resultado da quantidade de folhas em uma determinada área, ficando o substrato mais ou menos exposto.

Gráfico 11 - Temperatura na superfície de contato superior do componente estrutural, na superfície do substrato de terra e no dossel das plantas - substrato com vegetação de tipos diferente



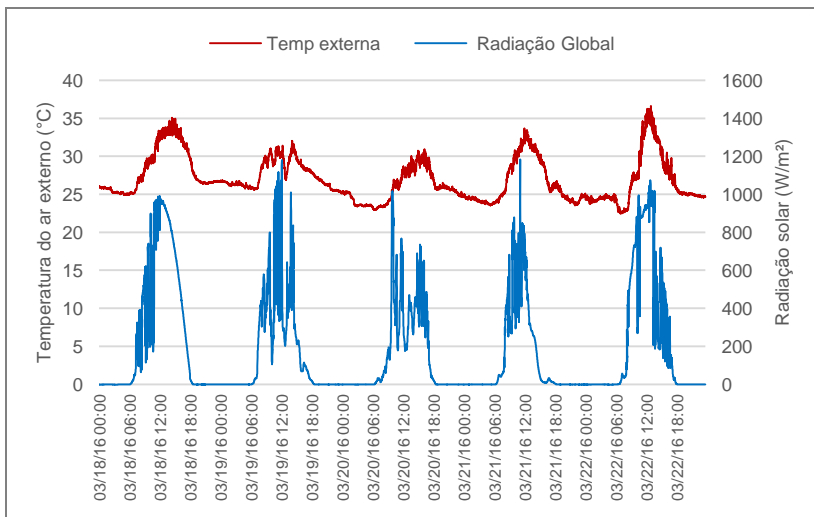
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 48 – Termografia (a) e foto (b) telhado verde com grama Sempre Verde e grama Preta



Fonte: acervo do autor - abr. 2016

Gráfico 12 - Radiação solar e temperatura do ar externo - substrato com vegetação de tipos diferente



Fonte: elaborado pelo autor

4.5. ETAPA 05: VARIÁVEL ISOLAMENTO TÉRMICO

Na última etapa de medição, as duas amostras de telhado verde apresentavam a mesma configuração (10 cm de substrato e grama Sempre Verde), sendo que na plataforma 01 incluiu-se uma camada de isolamento térmico XPS 25 mm entre o componente estrutural e a impermeabilização. Os resultados das duas amostras de telhado verde foram comparados a uma cobertura de referência, com telha de fibrocimento 6 mm de espessura.

As condições climáticas nessa etapa de medição apresentaram grande variação quando comparado as etapas anteriores. A temperatura média do ar externo para os cinco dias de medição foi de 20,20°C, ou seja, menor do que a temperatura do ar no interior da bancada. Assim, o fluxo de calor passou a ser ascendente nessa etapa.

O Gráfico 13 mostra as curvas de fluxo de calor medidos na superfície de contato superior da laje de concreto para todas as plataformas. A diferença entre o fluxo de calor máximo registrado na superfície de contato das amostras de telhado verde com e sem isolamento térmico foi em média de 79,6% e 66%, respectivamente, em comparação com a cobertura de referência. O percentual máximo foi encontrado no dia 11/05/16, quando a temperatura do ar externo foi maior (Gráfico 15). Nesse dia o fluxo de calor registrado na superfície de contato superior do componente estrutural da cobertura de referência foi de 55,45 W/m². As amostras de telhado verde apresentaram fluxo negativo em todo o período,

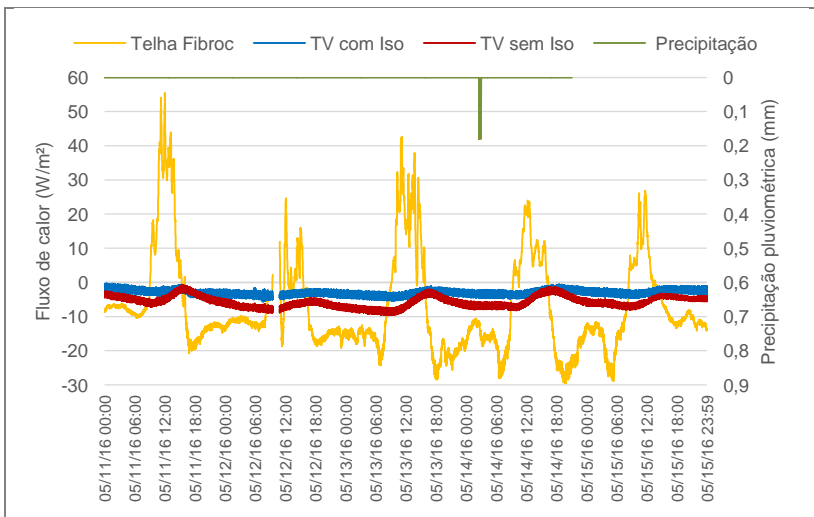
sendo que o maior valor foi registrado também no dia 11/05/16 (- 0,22 W/m² para a amostra com isolamento térmico e - 0,78 W/m² para a amostra sem isolamento térmico).

A diferença média no fluxo de calor máximo entre as amostras de telhado verde foi de 61,9%, sendo que a amostra sem isolamento térmico apresentou fluxo de calor negativo maior.

As amostras de telhado verde apresentaram redução da amplitude de fluxo de calor em comparação com a cobertura de referência. Enquanto que a cobertura com telha de fibrocimento apresentou amplitude média no fluxo de calor de 60,07 W/m², as amostras de telhado verde com e sem isolamento térmico apresentaram amplitude de 4,09 W/m² e 5,95 W/m² respectivamente.

Analisando a integral das curvas de fluxo de calor para as três plataformas, observa-se que em 100% do período as amostras de telhado verde apresentaram fluxo negativo, retirando calor da laje de concreto. A cobertura de referência apresentou 75,2% do fluxo de saída, representando 75,4% do tempo durante o período de coleta de dados.

Gráfico 13 - Fluxo de calor na superfície de contato superior do componente estrutural e precipitação - telhado verde com e sem isolamento térmico



Fonte: elaborado pelo autor

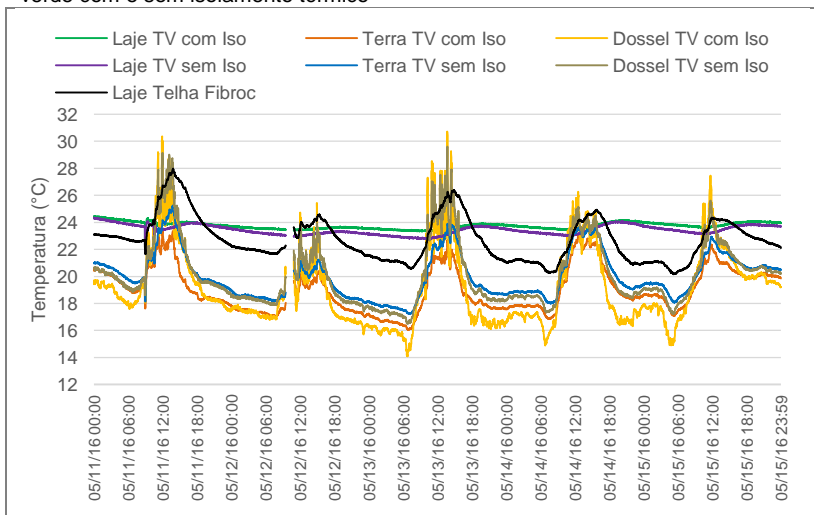
O Gráfico 14 apresenta as curvas de temperaturas na superfície de contato superior do componente estrutural, no substrato e no dossel das plantas. A diferença entre as temperaturas máximas na superfície de contato superior da laje de concreto das amostras de telhado verde com e sem isolamento térmico, em comparação com a cobertura de referência foi

de no máximo 3,50°C e 3,61°C respectivamente no dia 11/05/16 (mesmo dia em que foram registradas a temperatura do ar externo e radiação solar mais elevadas). Entretanto, a mesma comparação entre as temperaturas médias na superfície superior de contato do componente estrutural mostra que as amostras de telhado verde registraram temperaturas superiores em relação a cobertura de referência, chegando a uma diferença de 1,69°C entre a amostra com isolamento térmico e a cobertura de referência, e 1,41°C entre a amostra sem isolamento térmico e a cobertura de referência. Entre as amostras de telhado verde, essa diferença chegou a 0,38°C.

A diferença entre a temperatura média do dossel das amostras de telhado verde com e sem isolamento térmico foi de 1,02°C negativo, em média, para o período analisado. O mesmo resultado foi encontrado na comparação entre temperatura média na camada de substrato (- 1,02°C). A amostra com isolamento térmico apresentou temperaturas médias inferiores a amostra sem isolamento térmico.

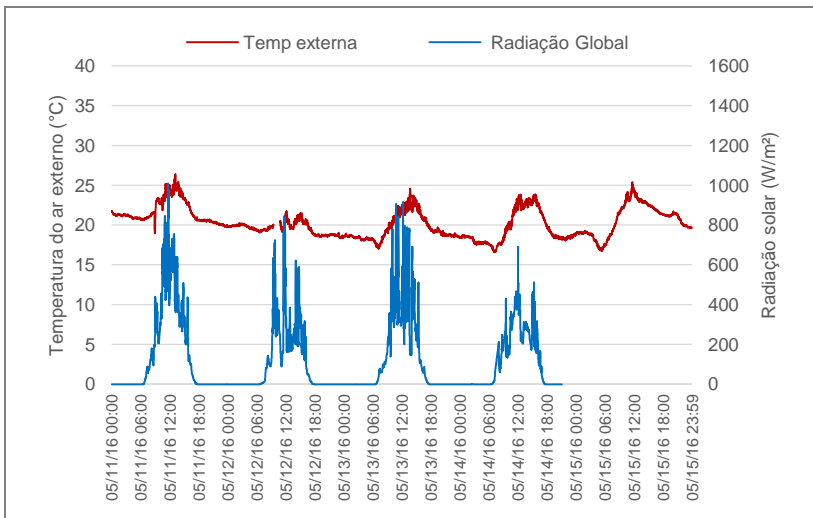
Comparando a diferença média, para os cinco dias de medição, entre a temperatura média do ar no dossel e a temperatura média na superfície de contato para as amostras com e sem isolamento, observa-se valores negativos (- 4,66°C e - 3,33°C para as amostras com e sem isolamento térmico, respectivamente). A temperatura média no dossel era menor do que a temperatura média na superfície superior da laje de concreto, possivelmente porque a temperatura média do ar externo no período analisado foi baixa se comparado as temperaturas médias das etapas de medição anteriores (20,20°C).

Gráfico 14 - Temperatura na superfície de contato superior do componente estrutural, na superfície do substrato de terra e no dossel das plantas - telhado verde com e sem isolamento térmico



Fonte: elaborado pelo autor

Gráfico 15 - Radiação solar e temperatura do ar externo - substrato com vegetação de tipos diferente



Fonte: elaborado pelo autor

4.6. VERIFICAÇÃO DO ATRASO TÉRMICO, FATOR DECREMENTAL E RESISTÊNCIA TÉRMICA

Os parâmetros atraso térmico (φ) e fator decremental (f) foram aplicados em cada etapa de medição como método de avaliação do comportamento térmico da cobertura vegetal, através da capacidade de armazenamento de calor. Os resultados apresentados na Tabela 5 referem-se ao dia em que foi registrada a maior temperatura do ar externo, em cada etapa de medição.

O fator decremental indica a redução de temperatura na superfície de contato em comparação com a temperatura do ar externo, no ciclo de um dia. De acordo com a Equação 6, apresentada no item 3.2, o fator decremental é diretamente proporcional a amplitude de temperatura na superfície de contato, ou seja, quanto maior a variação na temperatura da superfície, maior o fator decremental.

A Tabela 5 mostra que, quanto maior o fator decremental de uma cobertura, menor é o tempo transcorrido para que as ondas de calor passem do meio externo até a superfície de contato, apresentando um atraso térmico menor. Isso indica que, sistemas de cobertura menos resistentes as variações de temperatura do ar externo também têm menor capacidade de retenção de calor, ou seja, quanto maior o fator decremental, menor o atraso térmico.

Tabela 5 - Correlações entre parâmetros fator decremental (f) e atraso térmico (φ) para avaliação do comportamento térmico do telhado verde

| Variável | Configuração das amostras | f | φ |
|--------------------------------------|---------------------------|-------|-----------|
| Umidade (18 abr. 2016) | Subs. seco | 0,329 | 1,80 |
| | Subs. úmido | 0,327 | 2,17 |
| Espessura (14 fev. 2016) | Subs. 5 cm | 0,403 | 2,58 |
| | Subs 15 cm | 0,229 | 4,77 |
| Vegetação (15 mar. 2016) | Telha Fibroc. | 0,761 | 1,28 |
| | Subs. com Veg | 0,169 | 5,95 |
| | Subs. sem Veg | 0,290 | 5,10 |
| Tipo de vegetação (22 mar. 2016) | Telha Fibroc. | 0,614 | 1,00 |
| | Gramma Sempre Verde | 0,118 | 4,87 |
| | Gramma Preta | 0,088 | 4,87 |
| Isolamento térmico (11 mai. 2016) | Telha Fibroc. | 0,484 | 0,18 |
| | TV com Iso. | 0,059 | 7,47 |
| | TV sem Iso. | 0,084 | 7,92 |

Fonte: elaborado pelo autor

Os Gráficos de barras 16 (fator decremental) e 17 (atraso térmico) apresentam a correlação de dados da Tabela 5. Os resultados mais significativos nos parâmetros analisados são apontados pela variável espessura. O aumento da camada de substrato de 5 cm para 15 cm reduziu em 43% o fator decremental e aumentou em 85% o atraso térmico. Esses resultados indicam que a presença da camada de terra caracteriza o telhado verde como estratégia de elevada inércia térmica.

Outra variável de significativa importância no amortecimento da temperatura é a presença da vegetação, reduzindo em 42% o fator decremental com a adição da camada vegetal sobre o substrato. Se comparado a cobertura de referência, o amortecimento chega a 77%. As temperaturas médias na superfície de contato da cobertura de referência, telhado verde com vegetação e telhado verde sem vegetação foi de 25,38, 23,34 e 23,83°C, respectivamente. O sombreamento proporcionado pelas folhas das plantas sobre o solo reduz a transferência do calor até o componente estrutural e também a variação da temperatura na mesma superfície.

O tipo de vegetação utilizado não apresentou efeito para o parâmetro atraso térmico, enquanto que para o fator decremental, a variável de menor contribuição foi o teor de água no substrato.

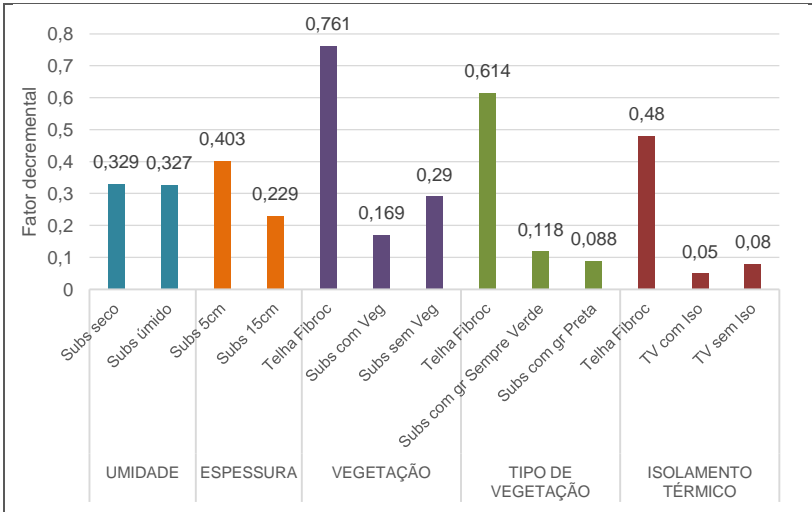
Nas três etapas em que foram realizadas comparações com a cobertura de referência (com telha de fibrocimento 6 mm), foi possível observar que qualquer das amostras de telhado verde das respectivas etapas de medição apresentam um desempenho melhor. A baixa capacidade de retenção de calor pela cobertura com telha de fibrocimento, resulta em um atraso menor da temperatura máxima registrada na

superfície de contato, em relação a temperatura externa, e um fator decremental alto, o que indica baixa capacidade de amortecimento térmico.

A última etapa de medição ocorreu num período em que a média de temperatura do ar externo era menor do que a temperatura no interior da bancada. As temperaturas médias na superfície de contato da cobertura de referências, dos telhados verdes com isolamento térmico e sem isolamento térmico foi de 22,30°C, 23,87°C e 23,54°C, respectivamente. Considerando uma situação de frio, é favorável que a cobertura mantenha uma temperatura mais elevada, indicando maior resistência a perda de calor.

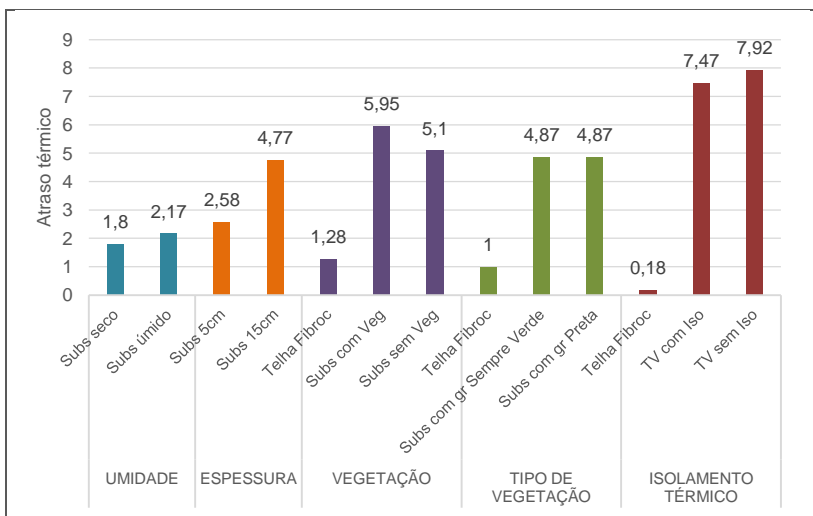
No Gráfico 16 observa-se que as amostras que resultaram em um amortecimento maior da temperatura (valores menores de fator decremental) correspondem àquelas com associação de substrato mais vegetação, indicando o potencial do telhado verde, no conjunto de suas camadas, como um sistema com desempenho térmico eficiente.

Gráfico 16 - Parâmetro fator decremental para cada etapa de medição



Fonte: elaborado pelo autor

Gráfico 17 – Parâmetro atraso térmico para cada etapa de medição



Fonte: elaborado pelo autor

Para o cálculo da resistência térmica (Tabela 6) foi considerado fluxo de calor ascendente, pois no período de medição, a temperatura média do ar externo foi 20,20°C, ou seja, inferior a temperatura do ar no interior da bancada experimental (23,5°C). Conforme o método apresentado no item 3.2, os valores da Tabela 6 compreendem a resistência térmica total (R_T), de ambiente a ambiente.

A resistência térmica encontrada para a amostra de telhado verde sem isolamento térmico (0,73 m^2K/W) está entre a faixa sugerida por Tabares-Velasco e Srebric (2011) para o tipo extensivo (0,37 a 0,85 m^2K/W).

A resistência térmica da cobertura de referência, se considerado fluxo de calor descentente, seria 0,47 m^2K/W e, conseqüentemente, o valor de transmitância térmica seria 2,11 W/m^2K .

Tabela 6 - Valores calculados para resistência térmica (R_T) e transmitância térmica (U) das três amostras

| Amostra | R_T (m^2K/W) | U (W/m^2K) |
|------------------------------|--------------------|------------------|
| Telhado verde com isolamento | 1,33 | 0,75 |
| Telhado verde sem isolamento | 0,73 | 1,35 |
| Telha de fibrocimento | 0,33 | 2,98 |

Fonte: elaborado pelo autor

Entende-se que a avaliação do comportamento térmico do telhado verde não se dá da melhor forma a partir da análise dos valores de

resistência e transmitância térmicas uma vez que estes variam com o teor de umidade presente nas camadas. Entretanto, os valores encontrados para transmitância térmica nas três amostras analisadas nessa pesquisa, foram confrontados aos valores estabelecidos pelas normas regulamentos e certificações brasileiros (Tabela 7) como caráter especulativo.

A absorvância solar das amostras de telhado verde não foi estabelecida. Entretanto, segundo Saiz et al (2006), a propriedade fundamental do telhado verde é sua baixa absorvância solar, reduzindo assim o fluxo de calor através do telhado. Isso porque grande parte do calor absorvido é utilizado pelas plantas para o processo de fotossíntese. Parizotto Filho (2010) utilizou, em sua pesquisa, absorvância solar do telhado verde igual a 0,55. Tabares-Velasco e Srebric (2012) usaram, em seus cálculos, absorvância solar igual a 0,5.

Tabela 7 - Nível de classificação de desempenho alcançado pelas amostras, de acordo com normas, regulamentos e certificações brasileiros

| DIRETRIZ | CONDICIONANTE | U (W/m²K) | DESEMPENHO | TV com Iso. | TV sem Iso. | Telha Fibroc. |
|----------|-------------------|------------|------------|-------------|-------------|---------------|
| 15.220-2 | --- | $\leq 2,0$ | MÍN. | ✓ | ✓ | X |
| 15.575-5 | $\alpha \leq 0,6$ | $\leq 2,3$ | MÍN. | ✓ | ✓ | X |
| | | $\leq 1,5$ | INTERM. | ✓ | ✓ | X |
| | | $\leq 1,0$ | SUP. | ✓ | X | X |
| | $\alpha > 0,6$ | $\leq 1,5$ | MÍN. | ✓ | ✓ | X |
| | | $\leq 1,0$ | INTERM. | ✓ | X | X |
| | | $\leq 0,5$ | SUP. | X | X | X |
| RTQ-R | $\alpha \leq 0,6$ | $\leq 2,3$ | A ou B | ✓ | ✓ | X |
| | $\alpha > 0,6$ | $\leq 1,5$ | A ou B | ✓ | ✓ | X |
| RTQ-C | Amb. cond. | $\leq 1,0$ | A | ✓ | X | X |
| | | $\leq 1,5$ | B | ✓ | ✓ | X |
| | Amb. não cond. | $\leq 2,0$ | A ou B | ✓ | ✓ | X |
| AQUA-HQE | --- | $\leq 2,3$ | MÍN. | ✓ | ✓ | X |
| | $\alpha > 0,6$ | $\leq 1,5$ | MÍN. | ✓ | ✓ | X |
| LEED | Amb. cond. | $\leq 1,0$ | PRERREQ. | ✓ | X | X |
| | Amb. não cond. | $\leq 2,0$ | PRERREQ. | ✓ | ✓ | X |

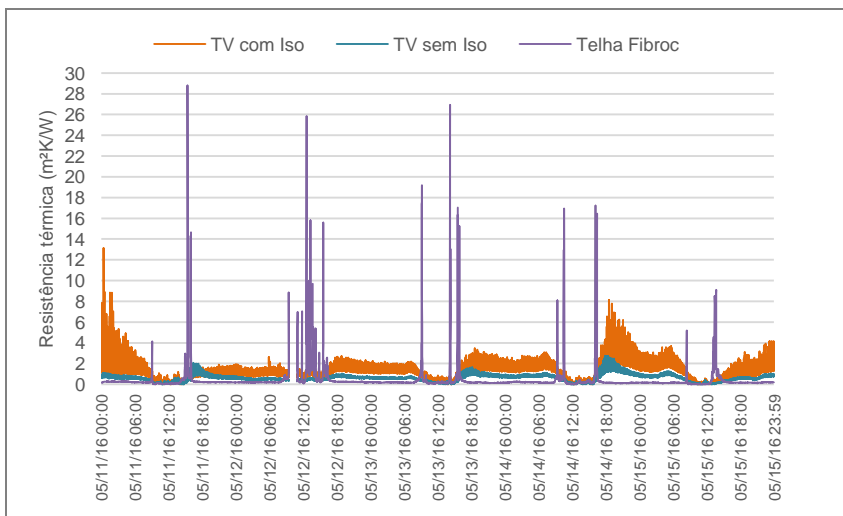
Fonte: elaborado pelo autor

O Gráfico 18 apresenta o comportamento da resistência térmica para as duas amostras de telhado verde e para a cobertura de referência na última etapa de medição, na superfície de contato superior do componente estrutural, onde estava instalado o transdutor de fluxo de calor. As curvas são resultado da Equação 8, aplicada para as três amostras de coberturas.

A curva da resistência térmica da cobertura de referência, com telha de fibrocimento 6 mm de espessura, permanece muito próxima de zero em todo o período, apresentando picos isolados equivalentes a oscilação do fluxo de calor registrado na superfície de contato. Isso porque a curva é resultado do cálculo que considera as medições do transdutor de fluxo de calor.

O gráfico mostra que as curvas da resistência térmica das amostras de telhado verde, com e sem isolamento térmico, se aproximam de zero durante o dia, enquanto que durante a noite a resistência térmica registrada foi maior. Portanto, as coberturas verdes permitem um ganho de calor durante o dia e, durante a noite, apresentam resistência maior a perda desse calor recebido.

Gráfico 18 - Resistência térmica para as amostras de telhado verde com e sem isolamento térmico e cobertura com telha de fibrocimento



Fonte: elaborado pelo autor

5. CONCLUSÕES

Dos elementos que compõem a envoltória de uma edificação, a cobertura é a área mais exposta à radiação solar direta. Nos países tropicais, como o Brasil, onde a intensidade da radiação solar é alta devido ao ângulo de incidência dos raios solares, a cobertura se torna o principal elemento da envoltória por onde grande parte do calor é transferido aos ambientes internos.

Esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de analisar o comportamento térmico do telhado verde a partir de uma comparação com amostras que representam diferentes composições construtivas de coberturas. O procedimento adotado nessa pesquisa foi do tipo experimental, a partir da construção de uma bancada, com temperatura interna controlada artificialmente, que suportava as amostras de coberturas estudadas. As amostras foram construídas sobre plataformas de concreto. A confiabilidade da bancada experimental foi verificada através da medição de validação com essas plataformas de concreto expostas, sem as amostras de coberturas.

Os dados registrados para análise do comportamento térmico das amostras de telhado verde e da cobertura de referência com telha de fibrocimento foram fluxo de calor e temperatura superficiais, além do registro das condições climáticas.

A análise dos resultados das cinco etapas de medição, com diferentes configurações de camadas de telhado verde, permitiu conhecer os elementos de maior impacto na eficiência do sistema e sua relação com as condições climáticas.

Entre as duas primeiras etapas de medições, onde as comparações foram realizadas sem a presença da camada vegetal, observou-se que a variação da espessura do substrato apresentou resultados mais significativos do que a variação do teor de umidade entre as amostras. Enquanto que a amostra com substrato úmido registrou fluxo de calor máximo 16% menor do que a amostra de substrato seco, essa diferença foi de 55% entre as amostras com 5 cm e 15 cm de terra. Quanto a análise dos dados de temperatura registrados, interessante observar que, apesar da temperatura média no substrato úmido ser até 8,63°C menor do que no substrato seco, a diferença entre a temperatura média registrada na laje de concreto foi de no máximo 0,79°C.

Quando uma das amostras recebeu a camada vegetal, na terceira etapa de medição, observou-se redução de 58,4% no ganho de calor máximo em relação a amostra sem vegetação. Quando comparada a cobertura de referência, que registrou fluxo de calor máximo de até 54 W/m², a redução do ganho foi de 84,1%.

A comparação entre amostras de telhado verde com diferente cobertura vegetal também mostrou reduções significativas no registro do fluxo de calor na superfície de contato, chegando a 52,2%. Essa variação é decorrente das diferentes características físicas e metabólicas das plantas, que resultam em diferentes taxas de sombreamento do substrato e de

evapotranspiração.

Quanto as análises de temperaturas médias registradas na superfície de contato superior do componente estrutural, o tipo de vegetação não influencia de maneira significativa, registrando diferença máxima de 0,22°C no período de medições. Essa diferença foi maior na comparação entre amostras com e sem vegetação, onde a temperatura na laje de concreto foi 0,49°C menor na amostra com grama. Possivelmente esse resultado foi observado devido ao sombreamento da vegetação sobre o substrato somado a perda de calor devido ao processo de evapotranspiração, evitando temperaturas elevadas na camada.

Nas amostras com vegetação, as maiores reduções de ganho de calor ocorreram em dias em que a umidade relativa do ar foi menor. Sem a camada vegetal, os resultados acompanham as variações da temperatura do ar externo. Essa ocorrência possivelmente é observada pois, estando o ar mais seco, o processo de evapotranspiração é potencializado, reduzindo os ganhos de calor pela cobertura.

Na última etapa de medição, onde avaliou-se o comportamento do telhado verde a partir da adição de isolamento térmico em uma das amostras, o cenário foi diferente das etapas anteriores, pois a temperatura média do ar externo era menor do que a temperatura do ar no interior da bancada experimental, fazendo com que o fluxo de calor fosse ascendente. Assim, a análise passou a ser a redução da perda de calor, e não do ganho. Enquanto que a cobertura de referência apresentou fluxo de calor superior a 50 W/m², as amostras de telhado verde apresentaram fluxo negativo em 100% do tempo analisado.

A amostra que recebeu a camada isolante reduziu a perda de calor pela cobertura em 61,9% em média, na comparação com a amostra sem isolamento térmico. Esse resultado sugere que, em regiões de clima predominantemente frio, o telhado verde aumentaria a carga para aquecimento interno. Seria importante conhecer os resultados da mesma comparação para o período de verão, com altas temperaturas do ar externo.

Os parâmetros atraso térmico e fator decremental, apontados para apoiar tecnicamente o desenvolvimento dos regulamentos municipais, possibilitaram identificar duas variáveis de impacto significativo no comportamento térmico do telhado verde para a cidade de Florianópolis. A espessura do substrato e a presença da vegetação resultaram em um maior atraso térmico e amortecimento da temperatura na superfície de contato, em relação a temperatura do ar externo. Por outro lado, as variações de tipos de vegetação e isolamento térmico não apresentaram contribuições de grande importância na análise dos parâmetros propostos. Além disso, comprovou-se que o telhado verde, mesmo sem uma camada de isolamento térmico, alcança níveis suficientes de desempenho recomendados pelas normas e regulamentos brasileiros.

O trabalho realizado evidencia que os telhados verdes são uma contribuição efetiva para melhorar o desempenho térmico da cobertura e permite quantificar o potencial que pode ser alcançado por este sistema construtivo para as condições climáticas observadas. Dessa forma tem-se

uma melhor compreensão dos benefícios que podem ser obtidos e das limitações que podem ser encontradas. Assim, este trabalho pode contribuir nos estudos de normas e regulamentos municipais que visam incluir telhados verdes como iniciativas de sustentabilidade nas edificações.

5.1. LIMITAÇÕES DO TRABALHO

O presente trabalho apresenta limitações que devem ser consideradas. A medição da temperatura e do fluxo de calor na superfície inferior do componente estrutural (laje de concreto), necessária para considerar o sistema construtivo das coberturas por completo (de ambiente a ambiente) foi realizada, porém não validada para fluxo de calor. A medição de validação comparou a energia medida nas superfícies superior e inferior da laje de concreto, a fim de garantir que o calor estava sendo conduzido de modo uniforme pela camada, porém os dados não eram confiáveis. Possivelmente alguma interferência de umidade na laje de concreto provocou as variações registradas.

A análise do teor de umidade presente no substrato de terra das amostras de telhado verde em todas as etapas de medição estava presente no desenvolvimento do trabalho, desde a revisão de literatura até elaboração da metodologia. Entretanto, o sensor adotado apresentou fragilidades que não possibilitaram o uso desse instrumento nas etapas de medição.

Não foi possível realizar todas as etapas de medição no período de calor, conforme previsto no início da pesquisa, por ser esse o clima predominante na cidade onde o trabalho se desenvolveu. O longo período necessário para a calibração da bancada experimental antes das etapas de medição, associado ao início precoce do registro das baixas temperaturas do ar, limitou as medições em períodos de calor para três meses. Assim, na última etapa de medição, onde foi adicionada uma camada de isolamento térmico na plataforma 01, as condições climáticas eram atípicas para o período e incompatíveis com as condições das etapas anteriores.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para futuros trabalhos relacionados ao tema, recomenda-se:

- Adotar como componente estrutural algum elemento capaz de não absorver umidade a fim de possibilitar a utilização do transdutor de fluxo de calor em sua superfície inferior;

- Aprofundar a questão da absorção solar do sistema telhado verde, uma vez que as normas e regulamentos brasileiros levam em consideração esta condicionante, e não apenas a transmitância térmica para coberturas. Considerando que as plantas absorvem uma taxa alta de radiação para o processo de fotossíntese, esse tema mostrou-se relevante para a análise dos resultados. A evolução desse assunto poderia resultar numa pesquisa comparativa entre o sistema telhado verde e outros sistemas de coberturas com valores variados de absorção solar.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-2**: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.
- _____. **NBR 15.220-3**: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.
- _____. **NBR 15.575-5**: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 5: Requisitos para sistemas de cobertura. Rio de Janeiro, 2013.
- APROUL, J. et al. Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. **Energy and Buildings** v. 71 p. 20-27, 2014.
- AYATA, T. TABARES-VELASCO, P. C. SREBRIC, J. An investigation of sensible heat flux at a green roof in a laboratory setup. **Building and Environment** v. 46 p. 1851-1861, 2011.
- A.U.D - ARCHITECTURE & URBAN DESIGN. **Climate Consultant**. Versão 5.4. UCLA - A.U.D, 2012. Disponível em: <www.energy-design-tools.aud.ucla.edu>. Acesso em: 30 junho 2015.
- BERARDI, U. GHAFFARIANHOSEINI, A. GHAFFARIANHOSEINI, A. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roof. **Applied Energy** v. 115 p. 441-428, 2014.
- BEZERRA, E. **Os Jardins Suspensos da Babilônia**. Museu de Imagens. Disponível em: <<http://www.museudeimagens.com.br>>. Acesso em: 07 set. 2015.
- CANOAS. Lei nº 5.840, de 27 de maio de 2014. Dispõe sobre a criação de telhados verdes e seus critérios técnicos especificados nesta lei e dá outras providências. Diário Oficial de Canoas, Canoas, 30 mai. 2014. Edição 769, p. 41. Disponível em: <<http://leismunicipa.is/jesft>>. Acesso em: 30 mai. 2015.
- CARTER, T. FOWLER, L. Establishing green roof infrastructure through environmental policy instruments. **Environmental Management** v. 42. p. 151-164, 2008.
- DECAGON DEVICES. **LAI: theory and practice**. v. 1.0. Pullman, WA. 2014.

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

D'ORAZIO, M. DI PIERNA, C. DI GIUSEPPE, E. Green roof yearly performance: a case study in a highly insulated building under temperate climate. **Energy and Buildings** v. 55 p. 439-451, 2012.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas**: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA. 2008. 152f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2008.

FCAV - FUNDAÇÃO CARLOS ALBERTO VANZOLINI. **Referencial técnico de certificação** - Edifícios do setor serviços - Processo AQUA. v. 0. São Paulo: FCAV, 2007.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Building** v. 18. p. 11-23, 1992.

GOIÂNIA. Lei Complementar nº 235, de 28 de dezembro de 2012. Institui o programa IPTU Verde no Município de Goiânia. Diário Oficial de Goiânia, Goiânia, 28 dez. 2012. Edição 5500, p. 2. Disponível em: <<http://leismunicipa.is/jmacq>>. Acesso em: 30 mai. 2015.

GÜTHS, S. NICOLAU, V. P. **Instrumentação em ciências térmicas**. Florianópolis: UFSC, 1998.

HINZ, E. **Estudio del comportamiento térmico de un sistema pasivo de enfriamiento evaporativo indirecto con cobertura vegetal en un clima tropical**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Escola Técnica Superior de Engenheiros Industriais, Universidade de Zulia, Maracaibo. 2006.

IKEMATSU, P. **Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes**. 2007. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Tradução e revisão técnica de Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros. **Anexo V** da Portaria n. 50, de 01 de fevereiro de 2013. Disponível em:

<<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtosPBE/regulamentos/AnexoV.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2016

ITU. Lei nº 1.579, de 22 de novembro de 2013. Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação de "telhado verde" nos locais que especifica, e dá outras providências. Itu, 19 dez. 2013. Disponível em: <<http://leismunicipa.is/cmtdr>>. Acesso em: 30 mai. 2015.

JIM, C. Y. Diurnal and partitioned heat-flux patterns of coupled green-building roof systems. **Renewable Energy** v. 81 p. 262-274, 2015.

JIM, C. Y. PENG, L. L. H. Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof. **Urban Forestry & Urban Greening** v. 11 p. 73-85, 2012.

JIM, C. Y. HE, H. Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem. **Ecological Engineering** v. 36 p. 1052-1063, 2010.

JOHN, V. M. SAVASTANO JUNIOR. H. Perspectivas do fibrocimento sem amianto no Brasil. **Folha de S. Paulo**, São Paulo, 08 fev. 2014. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/opiniao/2014/02/1409192-holmer-savastano-jr-e-vanderley-m-john-perspectivas-do-fibrocimento-sem-amianto-no-brasil.shtml#>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

LEHMANN, S. Low carbon districts: mitigating the urban heat island with green roof infrastructure. **City, Culture and Society** v. 5 p. 1-8, 2014.

LIZ, D. G. S. de; MIZGIER, M. O.; GÜTHS, S. Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais**. Porto Alegre: ANTAC, 2016.

LUCKETT, K. **Green roof construction and maintenance**. McGraw-Hill Professional, 2009. 208p.

MICHELS, C. LAMBERTS, R. GÜTHS, S. Evaluation of heat flux reduction provided by the use of radiant barriers in clay tile roof. **Energy and Buildings** v.40, p. 445-451, 2008a.

_____. Theoretical/experimental comparison of heat flux reduction in roofs achieved through the use of reflective thermal insulators. **Energy and Buildings** v 40, p. 438-444, 2008b.

MIRANDA, R. L. **Como fazer e o que é um telhado verde**. Ecoeficientes. Disponível em: <<http://www.ecoeficientes.com.br>>. Acesso em: 27 set. 2015.

MOODY, S. S. SAILOR, D. J. Development and application of a building energy performance metric for green roof system. **Energy and Buildings** v. 60, p. 262-269, 2012.

NARDINI, A. ANDRI, S. CRASSO, M. Influence of substrate depth and vegetation type on temperature and water runoff mitigation by extensive green roofs: shrubs versus herbaceous plants. **Urban Ecosyst** v. 15, p. 697-708, 2012.

NASCIMENTO, W. C.; FREITAS, M. C. D.; SCHMID, A. **Coberturas verdes: a renovação de uma ideia**. In: XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Fortaleza, 2008. Disponível em: <www.infohab.org.br>. Acesso em: 26 set. 2015.

OULDBOUKHITINE, S. E. et al. Assessment of green roof thermal behavior: a coupled heat and mass transfer model. **Building and Environmental** v. 46, p. 2624-2631, 2011.

PARIZOTTO FILHO, S. **Telhado vegetado**. In: Lamberts, R. et al (ed.). Casa eficiente: bioclimatologia e desempenho térmico. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010. p. 89-122.

PEREIRA, C. D. **Influência da refletância e da emitância de superfícies externas no desempenho térmico de edificações**. 2014. 207f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2014.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

POUEY, M. T. F.; SATTLER, M. A.; SCHNEIDER, P. S. Coberturas verdes: análise de desempenho térmico. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 1998. p. 473-481.

RECIFE. Lei nº 18.112, de 12 de janeiro de 2015. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação de "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. Diário Oficial do Recife, Recife, 13 jan. 2015. Disponível em: <<http://leismunicipa.is/cjeuk>>. Acesso em: 30 mai. 2015.

SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. **ScienceDirect** v. 40, p. 1466-1478, 2008.

SAIZ, S. et al. Comparative life cycle assessment of standard and green roofs. **Environmental Science and Technology** v. 40 p. 4312-4316, 2006.

SANTAMOURIS, M. et al. Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athenas, Greece. **Science Direct** v. 32 p. 1781-1788, 2007.

SPALA, A. et al. On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system in an office building in Athens, Greece. **Science Direct** v. 33 p. 173-177, 2008.

TABARES-VELASCO, P. C. SREBRIC, J. Experimental quantification of heat and mass transfer process through vegetated roof sample in a new laboratory setup. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. v. 54 p. 5149-5162, 2011.

_____. A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer condition. **Building and Environment** v. 49 p. 310-323, 2012.

TAKEBAYASHI, H. MORIYAMA, M. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. **Building and Environmental** v. 42 p. 2971-2979, 2007.

USGBC - U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. **LEED reference guide for green building design and construction**. Nova York: USGBC, 2009.

ZHAO, M. et al. Effects of plant and substrate selection on thermal performance of green roof during the summer. **Buildings and Environmental** v. 78 p. 199-211, 2014.

ZHANG, X. et al. Barrier to implement extensive green roof systems: a Hong Kong study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 16 p. 314-319, 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE FLUXO DE CALOR (FLUXÍMETRO)

Para a calibração dos transdutores de fluxo de calor foi empregado o método transdutor auxiliar. O sistema físico para calibração consiste na sobreposição das seguintes camadas: placa isotérmica (como fonte de temperatura fria), transdutor a ser calibrado, resistência térmica aquecedora, transdutor pré-calibrado (auxiliar) e isolante térmico (Figura 49).

Figura 49 - Sistema de calibração com transdutor auxiliar



Fonte: adaptado de Güths; Nicolau, 1998

A resistência aquecedora, submetida a uma corrente elétrica conhecida, gera calor e dissipa aos transdutores. Estes geram um sinal de resposta (força eletromotriz Seebeck) em milivolt (registrado por um multimetro digital) proporcional ao fluxo de calor que está sendo transmitido.

Ao considerar-se P , U e R as potência, tensão e resistência da resistência aquecedora, respectivamente, pode-se montar a seguinte relação:

$$P = Ri^2 [W] \quad (11)$$

Configurando-se o sistema da maneira mostrada na Figura 49, sendo $V_a'' [V]$ a f.e.m. Seebeck e c_a a constante de calibração do transdutor de constante conhecida, enquanto $V_b'' [V]$ e c_b as f.e.m. Seebeck e constante de calibração do transdutor a calibrar, tem-se:

$$P = c_a V_a'' + c_b V_b'' \quad (12)$$

Reorganizando a equação acima se obtém:

$$c_b = \frac{(P - c_a V_a'')}{V_b''} \left[\frac{W}{V} \right] \quad (13)$$

Sendo c_b linear na faixa de temperatura que vai de -175°C até 250°C .

Nessa experiência utilizou-se uma resistência aquecedora com valor de resistência elétrica igual a 708Ω , ligada a uma fonte de tensão medida como $10,0\text{ V}$ e com corrente medida de $14,1 * 10^{-3}\text{A}$. Calculando-se a potência, então, encontrou-se:

$$P = Ri^2 = 708 * (14,1 * 10^{-3})^2 = 0,139\text{ W} \quad (14)$$

Essa potência é dissipada pela resistência aquecedora na forma de calor, então os fluxímetros respondem com f.e.m. proporcional à potência dissipada, que é medida com o auxílio de um multímetro digital. O fluxímetro de constante c_a conhecida e igual a 274 W/V respondeu com tensão $V_a'' = 0,073\text{ mV}$, enquanto o fluxímetro que pretende-se calcular, de constante c_b desconhecida, respondeu com tensão de $V_b'' = 0,440\text{ mV}$. Sabendo essas medidas pôde-se calcular:

$$c_b = \frac{(P - c_a V_a'')}{V_b''} = \frac{[0,139 - (274 * 0,073 * 10^{-3})]}{0,440 * 10^{-3}} = 270 \frac{W}{V} \quad (15)$$

Pode-se reparar que as constantes de proporção entre fluxo de calor e f.e.m. de ambos os fluxímetros são parecidos, o que é esperado, uma vez que ambos foram fabricados utilizando os mesmos métodos, os mesmos materiais, o mesmo projeto e possuem as mesmas dimensões.

Os fluxímetros utilizados no experimento foram todos calibrados utilizando-se o mesmo método, obtendo-se os resultados da Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da calibração dos transdutores

| Transdutor | $c \left(\frac{W}{V} * 10^3 \right)$ |
|------------|---------------------------------------|
| 1 | 0,1311 |
| 2 | 0,1463 |
| 3 | 0,1467 |
| 4 | 0,1272 |
| 5 | 0,1148 |
| 6 | 0,1311 |
| 7 | 0,1185 |
| 8 | 0,1339 |

Fonte: elaborado pelo autor

APÊNDICE B - CALIBRAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL EQUIPADA APENAS COM AS PLATAFORMAS DE CONCRETO

A fim de garantir o correto funcionamento da bancada experimental e validar os resultados obtidos nos futuros ensaios com o sistema telhado verde, foi realizada a calibração do aparato apenas com as plataformas de concreto.

Para a calibração da bancada utilizou-se como temperatura de referência um termistor NTC-30k, com precisão de até 0,2°C localizado no centro da câmara. Conhecendo-se a temperatura do ar interno da câmara é possível programar o controlador Proporcional Integral Derivado (PID), ligado ao termistor, a fim de estabilizar e controlar a temperatura interna do ar no *setpoint* determinado.

O parâmetro Proporcional pode ser considerado como o termo primário (Equação 16). Ele está linearmente ligado ao erro medido pelo controlador, obtido ao multiplicar esse erro pela constante definida pelo usuário K_p . Quanto maior o erro, mais bruscamente o P fará a temperatura variar.

$$P = K_p e(t) \quad (16)$$

O parâmetro Integral é proporcional tanto à magnitude quanto à duração do erro (Equação 17). Ele soma diversos erros instantâneos em um período de tempo e procura fazer todos eles se anularem, eliminando erro residual e mantendo o comportamento médio da temperatura o mais próximo possível do *setpoint*. O valor de K_i é definido pelo usuário.

$$I = K_i \int e(t) dt \quad (17)$$

O parâmetro Derivativo procura evitar que a temperatura varie bruscamente, ao multiplicar a taxa de variação da temperatura com o valor definido pelo usuário K_d , evitando mudanças súbitas de temperatura e promovendo a estabilidade do sistema (Equação 18).

$$D = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (18)$$

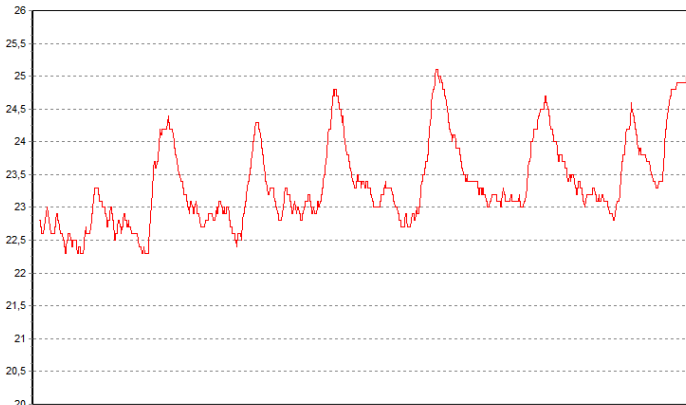
Os três parâmetros, então, trabalham em conjunto, mantendo a temperatura sempre o mais estável e perto do *setpoint* possível.

Para a calibração dos parâmetros PID utilizou-se o método Ziegler-Nichols - oscilação contínua com ganho proporcional. Esse método consiste em manter os valores de T_i e T_d nulos e aumentar o parâmetro P até que o ciclo comece a oscilar. Iniciada a oscilação (Gráfico 19), encontra-se o ganho crítico (K_{cr}) e mede-se o período da onda (P_{cr}). Com os valores da Tabela 9 é possível encontrar os parâmetros PID finais.

Tabela 9: Valores de PID para o método de Ziegler-Nichols

| Tipo de controlador | K_p | T_i | T_d |
|---------------------|--------------|--------------|---------------|
| P | $0,5K_{cr}$ | 0 | 0 |
| PI | $0,45K_{cr}$ | $P_{cr}/1,2$ | 0 |
| PID | $0,6K_{cr}$ | $0,5P_{cr}$ | $0,125P_{cr}$ |

Nesse experimento utilizou-se a função de auto ajuste do controlador PID para definir um valor inicial de K_p a fim de variá-lo até que se encontrasse $K_{cr} = 2,5$. Uma vez que o K_{cr} foi encontrado, obteve-se experimentalmente o Gráfico 19 e mediu-se o valor de $P_{cr} = 1,6$.

Gráfico 19: Temperatura da câmara termicamente controlada com $P = K_{cr}$, dia 30/07/2015

Fonte: acervo Caren Michels, 2015

Ao utilizar-se a Tabela 9, encontrou-se:

$$K_p = 0,6K_{cr} = 0,6 * 2,5 = 1,5 \quad (19)$$

$$K_i = 0,5 * P_{cr} = 0,5 * 1,6 = 0,8 \quad (20)$$

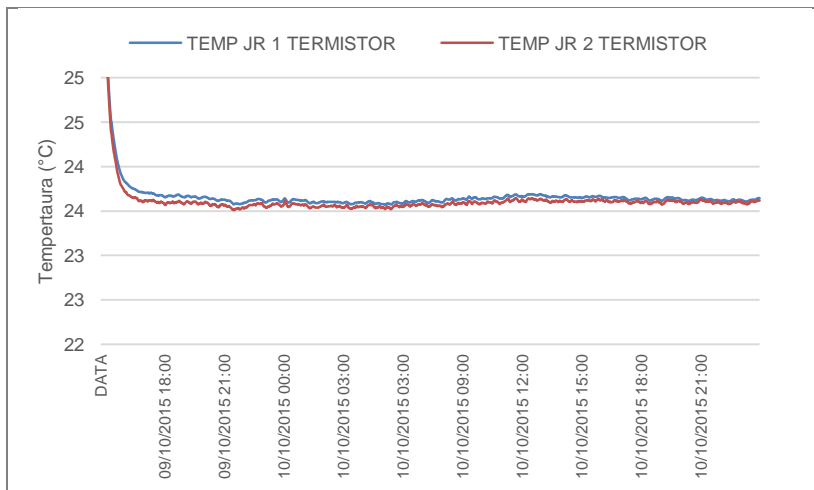
$$K_d = 0,125 * P_{cr} = 0,125 * 1,6 = 0,2 \quad (21)$$

Após a calibração do controle PID, iniciou-se um ensaio o qual teve duração de dois dias. Os resultados são apresentados no Gráfico 20. Como as Juntas de Referência estão instaladas no interior da bancada experimental, estas também representam a temperatura do ar interno.

Através deste ensaio, pode-se verificar que o ambiente interno da bancada experimental apresenta uma boa homogeneidade de

temperaturas, desta maneira, a bancada experimental está pronta para a instalação das coberturas para realizar os ensaios.

Gráfico 20: Temperaturas das juntas de referência



Fonte: elaborado pelo autor

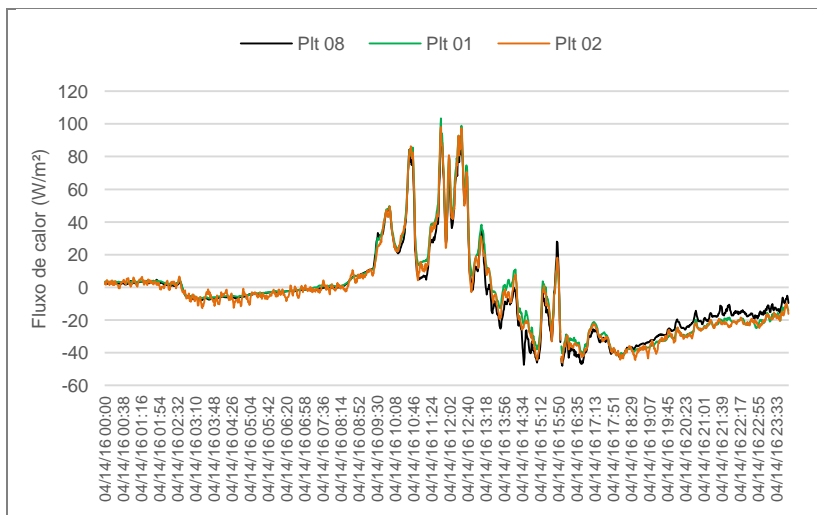
APÊNDICE C – MEDIÇÃO DE VALIDAÇÃO COM AS PLATAFORMAS DE CONCRETO EXPOSTAS

A fim de validar os resultados obtidos nos ensaios com as amostras de telhado verde e da cobertura de referência, foi realizada uma medição com os sensores instalados nas plataformas de concreto expostas (sem coberturas).

A medição de validação foi realizada utilizando-se os sensores instalados na superfície superior do componente estrutural, sendo eles transdutores de fluxo de calor e termopares tipo T.

O Gráfico 21 apresenta os dados de fluxo de calor registrados na superfície das lajes de concreto sem cobertura. A diferença média dos dados registrado entre as plataformas 01 e 08, plataformas 02 e 08 e plataforma 01 e 02 é de $3,63 \text{ W/m}^2$, $3,36 \text{ W/m}^2$ e $2,23 \text{ W/m}^2$, respectivamente. Considerando a faixa de fluxo de calor registrado ($178,38 \text{ W/m}^2$), esses valores correspondem a, no máximo, 2% de diferença.

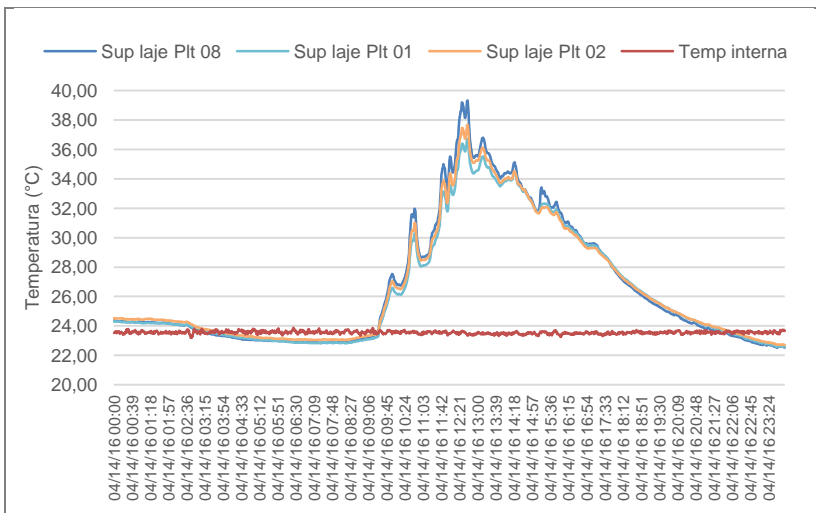
Gráfico 21 - Fluxo de calor registrado na superfície de contato superior do componente estrutural com as plataformas expostas durante 24 horas



Fonte: elaborado pelo autor

O Gráfico 22 apresenta os dados de temperatura registrados na superfície das lajes de concreto sem cobertura. A diferença média dos dados registrado entre as plataformas é inferior a $0,5^\circ\text{C}$. A diferença máxima foi registrada entre as plataformas 01 e 08, às 12h27, com $2,79^\circ\text{C}$. O gráfico também apresenta o registro da temperatura do ar interno, que permanece conforme calibração apresentada no Apêndice A.

Gráfico 22 - Temperatura registrada na superfície de contato superior do componente estrutural com as plataformas expostas durante 24 horas e temperatura do ar interno



Fonte: elaborado pelo autor