

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO TELHADO VERDE EXTENSIVO PARA FLORIANÓPOLIS¹

GREEN ROOF THERMAL BEHAVIOR THROUGH EXPERIMENTAL ANALYSIS FOR FLORIANÓPOLIS (BRAZIL)

DÉBORA STIEGEMEIER DE LIZ, MARTIN ORDENES, SAULO GUTHS

RESUMO

Em climas tropicais, a cobertura é o principal responsável por situações de sobreaquecimento nos ambientes adjacentes, pois é a área mais exposta à radiação solar. Como resposta, o telhado verde pode trazer benefícios em termos de conforto térmico e redução de consumo energético. Assim, a pesquisa pretende analisar o comportamento térmico do telhado verde por meio de um ensaio experimental em campo para identificar a participação dos elementos que compõem o sistema construtivo (espessura do substrato, camada vegetal e isolamento térmico), no ganho de calor pela cobertura. O ensaio foi realizado no período de verão em Florianópolis, Santa Catarina e foram registrados dados de temperatura e fluxo de calor superficiais. Os resultados mostram uma redução evidente no ganho de calor por parte do telhado verde, se comparado com um sistema convencional de telha de fibrocimento. As medições indicam também que a espessura do substrato e a presença da camada vegetal apresentam a maior redução no ganho de calor.

PALAVRAS-CHAVE: Arquitetura sustentável. Comportamento térmico. Experimento em campo. Telhado verde.

ABSTRACT

In tropical climates, building roofs is the main responsible for underneath indoor overheating situations since it is the most exposed surface to solar radiation. As an alternative, green roofs can bring several benefits in terms of thermal comfort and reducing energy consumption on air-conditioning systems. This research work aims to analyze the thermal behavior of green roofs through a field experiment in order to identify the participation of the different components in this roof system (soil thickness, different types of grass, and thermal insulation) on the heat gain process. Measurements were taken during the summer season in Florianópolis, Santa Catarina, and in all experiments surface temperature and surface heat flow were registered. Results show an evident reduction in heat gain on green roofs as compared to a conventional roof system. Also, an important influence on soil thickness and the presence of a vegetal layer for the heat gain reduction on green roofs were observed.

KEYWORDS: Sustainable architecture. Thermal performance. Field experiment. Green roof.



INTRODUÇÃO

Apesar da diversidade climática observada no Brasil, grande parte do território apresenta médias de irradiação global elevadas no plano horizontal. Pereira *et al.* (2006) mostram valores máximos de 6,50kWh/m² na Bahia e mínimos de 4,25kWh/m² em Santa Catarina. Essa radiação solar incidente na cobertura das edificações define em grande parte as condições de conforto térmico e consumo de energia para refrigeração nos ambientes internos subjacentes a ela.

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). Essa configuração no sistema construtivo de coberturas leva a valores de absorvância solar e a transmitância térmica superiores aos mínimos recomendados por norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, 2013) e exigidos por certificações de eficiência energética em edificações residenciais (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012). Essas normas e certificações utilizam a transmitância térmica (U) como parâmetro para comparação do desempenho térmico. No entanto, o valor U supõe um regime térmico permanente sem tomar em consideração os processos vivos do telhado verde que podem contribuir no desempenho térmico do sistema de cobertura. Um exemplo pode ser encontrado na biblioteca de componentes construtivos brasileiros (WEBER *et al.*, 2017), em que a transmitância térmica calculada para uma cobertura com telha de fibrocimento e laje de concreto (2,06W/m² °C) é menor que o valor calculado para um telhado verde extensivo também com laje de concreto (2,18W/m² °C). Assim, essa comparação leva a pensar que, aparentemente, a cobertura com telha de fibrocimento tem um desempenho térmico mais favorável se comparada com um telhado verde.

No Brasil, diversos experimentos em laboratório e em campo vêm sendo realizados a fim de investigar as propriedades termofísicas responsáveis pela redução dos ganhos de calor na cobertura e, conseqüentemente, das cargas térmicas da edificação (IKEMATSU, 2007; DORNELLES, 2008; MICHELS *et al.*, 2008; PEREIRA, 2014). Do mesmo modo, Silva *et al.* (2016) comprovaram recentemente, através de um amplo estudo por simulação computacional que, para o clima no litoral sul brasileiro, a absorvância solar e a transmitância térmica da cobertura estão entre as variáveis mais influentes sobre o desempenho térmico e energético para edificações residenciais.

Assim, o telhado verde aparece como uma alternativa para melhorar o desempenho térmico da cobertura. A composição básica para um telhado verde compreende o componente estrutural, camada impermeabilizante, camada drenante, manta geotêxtil, substrato e cobertura vegetal. Na literatura são definidos dois tipos de telhados verdes. As “coberturas verdes extensivas” são mais simples e resistentes, com menor espessura de substrato de terra (5 a 15cm), vegetação rasteira e baixa manutenção. Já

as “coberturas verdes intensivas” apresentam uma camada mais espessa de substrato de terra (20 a 60cm), que sustentam plantas de maior porte, requerendo manutenção periódica e sistemas de irrigação (PARIZOTTO FILHO, 2010; TABARES-VELASCO & SREBRIC, 2012).

O telhado verde é uma técnica milenar que apresenta diversos benefícios, entre eles destacam-se a redução no consumo energético das edificações (SANTAMOURIS, 2007; SPALA *et al.*, 2008), redução do efeito ilha de calor urbano (TAKEBAYASHI & MORIYAMA, 2007) e gestão de águas pluviais (NARDINI *et al.*, 2012).

Apesar de inúmeros benefícios, o uso de coberturas verdes apresenta limitações. Aproul *et al.* (2014), por meio 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.

Por ser um sistema vivo, o processo de transferência de calor em um telhado verde é significativamente diferente do que num telhado tradicional, não só pela mudança nas características térmicas dos materiais e nas propriedades das superfícies, mas também pelos processos metabólicos das plantas (SAILOR, 2008; JIM & HE, 2010).

Assim, na literatura podem ser encontrados inúmeros estudos aprofundados sobre a dinâmica de telhados verdes e a influência de diferentes parâmetros como o teor de umidade no substrato (MACHADO *et al.*, 2003; TABARES-VELASCO & SREBRIC, 2012), a taxa de evapotranspiração das plantas (HINZ, 2006; JIM & PENG, 2012), o tipo de vegetação e índice de área foliar (OULDBOUKHITINE *et al.*, 2011; ZHAO *et al.*, 2014, MATHEUS *et al.*, 2016), e a espessura do substrato (JIM & HE, 2010; SQUIER & DAVIDSON, 2016), entre outros. Todos esses estudos mostram que o telhado verde apresenta vantagens em termos de absorvância solar e a transmitância térmica na cobertura, conforme foi destacado por Silva *et al.* (2016), para o caso de Florianópolis.

No Brasil não existe norma ou regulamento que estabeleça parâmetros mínimos de desempenho térmico para projeto e execução de telhados verdes. Mesmo assim, 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 400m² de cobertura devem prever a instalação de telhado verde para sua aprovação (Lei nº 18.112, de 12 de janeiro de 2015) (RECIFE, 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) (ITU, 2013). O município de Canoas (RS) prevê a instalação de telhado verde em edificações residen-

ciais, 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) (CANOAS, 2014). Goiânia (GO), ao instituir o programa Imposto Predial e Território Urbano (IPTU Verde), incentiva o uso de telhados verdes em todas as coberturas disponíveis na edificação concedendo 3% de desconto no IPTU Verde (Lei Complementar nº 235, de 28 de dezembro de 2012) (GOIÂNIA, 2012). Recentemente entrou em vigor a Lei nº 5.965, de 16 de agosto de 2017 (BRASÍLIA, 2017), que institui o Programa IPTU Verde no Distrito Federal, concedendo 11% de desconto no imposto como incentivo à implantação de telhado verde em todos os telhados disponíveis no imóvel residencial e não residencial para esse tipo de cobertura.

Nesse sentido, segundo Carter e Fowler (2008), as políticas de telhados verdes deveriam abranger o financiamento de projetos demonstrativos ou de investigação científica para comprovar os benefícios dos telhados verdes. A partir dos fatos mencionados até o momento, faz-se necessário investigar os comportamentos termofísicos que envolvem o sistema telhado verde, a fim de contribuir com a produção de conhecimento científico como suporte para o avanço das discussões que envolvem a tecnologia em questão.

Assim, o objetivo principal deste trabalho de pesquisa é analisar, experimentalmente, o comportamento térmico do telhado verde a partir de uma comparação com amostras que representam diferentes composições construtivas de coberturas para observar a participação de cada um dos componentes. O experimento foi realizado na cidade de Florianópolis para avaliar a contribuição que o telhado verde poderia ter em uma situação de verão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa adotou-se o método experimental, que permite medições de campo em condições reais. Os ensaios ocorreram na cidade de Florianópolis no período de fevereiro a maio de 2016. 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.

Os ensaios foram realizados sobre uma bancada experimental, que consiste em uma câmara fechada e isolada termicamente a fim de manter a temperatura interna constante, com base em um sistema de climatização artificial. A bancada onde ocorreram as medições foi montada na cobertura do Bloco B da Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), onde ficou exposta às condições climáticas. A Figura 1 apresenta um perfil esquemático dela. A estrutura foi composta por cantoneiras metálicas e as dimensões externas da bancada eram de 3,30m de comprimento, 1,56m de largura e 1,10m de altura. As laterais e o fundo foram revestidos externamente com chapas de alumínio. Na parte superior foram apoiadas as lajes de concreto maciço que serviram de base

para o sistema de cobertura, com dimensões de 0,70 x 0,70m e espessura igual a 0,08m. Internamente, o revestimento era composto por 5cm de poliestireno expandido. Esse isolamento teve por objetivo reduzir as trocas de calor entre ambientes interno e externo. Dois equipamentos condicionadores de ar foram instalados, associados a duas bancadas de resistências elétricas com 200W cada, que com o auxílio de um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), mantiveram a temperatura interna constante (*setpoint* de 23,5°C). Sob cada uma das lajes de concreto, na parte interna da bancada, ventiladores foram instalados garantindo a distribuição uniforme do ar refrigerado.

Foram utilizadas três lajes de concreto como base para a pesquisa cujos resultados são apresentados neste artigo. Duas lajes receberam amostras de telhado verde com diferentes configurações e uma laje foi utilizada como referência, coberta com telha de fibrocimento 6mm de espessura. O componente estrutural era comum às três amostras, composto por concreto maciço moldado nas mesmas dimensões. Para estruturar a telha da cobertura de referência e para contenção das camadas dos telhados verdes foi utilizado caixa de madeira *pinus* tratado em autoclave. Internamente a essa caixa, na cobertura de referência foi aplicado isolamento térmico poliestireno expandido com 2cm de espessura, a fim de reduzir as trocas de calor com o ar externo através da caixa de madeira. Os sensores utilizados para coleta de dados foram termopar tipo T e transdutor de fluxo de calor (GÜTHS & NICOLAU, 1998). Os dados foram coletados a cada minuto, sendo registradas as médias do período de 5 minutos, por um sistema de aquisição de sinais Marca Agilent, modelo 34970A (Figura 1).

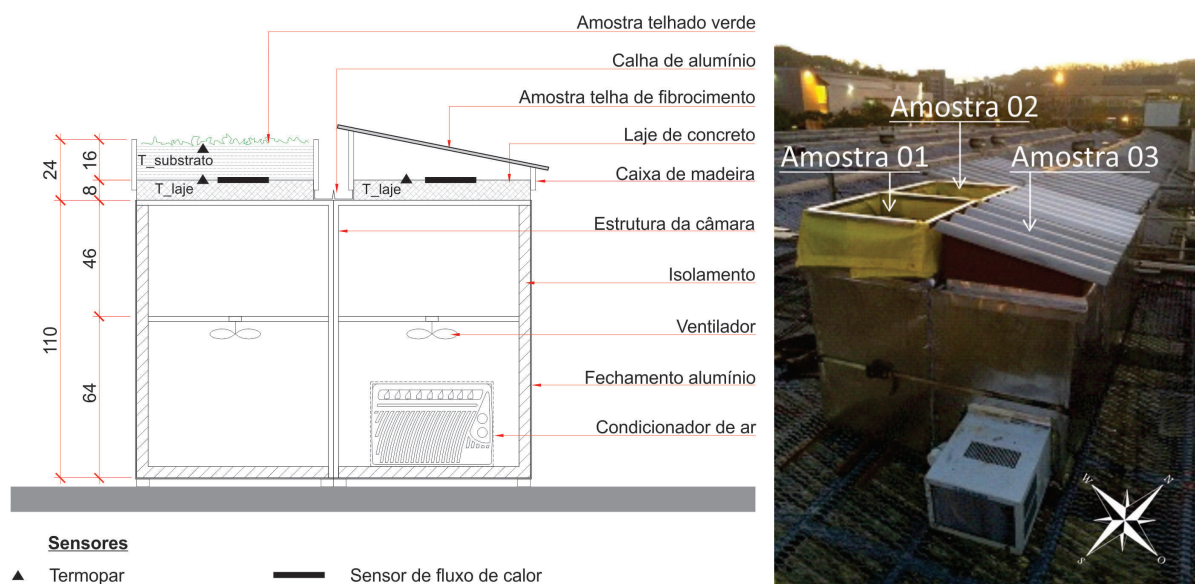


FIGURA 1 — Perfil esquemático da bancada experimental e instrumentação, à esquerda, e identificação das amostras. Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

Os dados climáticos durante o período de ensaio foram obtidos por meio da estação meteorológica *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) localizada no Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e distante aproximadamente 90 metros do local onde foi montada a bancada experimental. Os dados coletados foram radiação solar global, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica. Além destes, a temperatura do ar externo foi medida na própria bancada experimental, por um termopar tipo T inserido em um tubo de Policloreto de Polivinila (PVC) isolado e protegido da radiação solar direta. Adicionalmente, foi instalado um exaustor para garantir a circulação constante do ar em torno do termopar.

ETAPAS DE MEDIÇÃO

As etapas de medição para análise do comportamento térmico do telhado verde frente a diferentes composições ocorreram sequencialmente, representadas pela Amostra 1 e Amostra 2. Cada etapa apresentou uma variação de configuração na construção entre as amostras de telhado verde (Quadro 1). A coleta de dados de cada etapa teve duração de cinco dias. As camadas comuns nas amostras de telhado verde, que se repetiram em todas as etapas de medição, foram a camada impermeabilizante; a camada drenante, constituída por 5cm de espessura de argila expandida; e a manta geotêxtil (*Bidim*) para evitar o lixiviamento do

substrato. A Figura 2 mostra fotografias de cada etapa de ensaio.

Na Etapa 3 foi realizado o registro termográfico com a câmera ThermoCAM E25 a fim de verificar a variação de temperatura na superfície das plantas. 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.

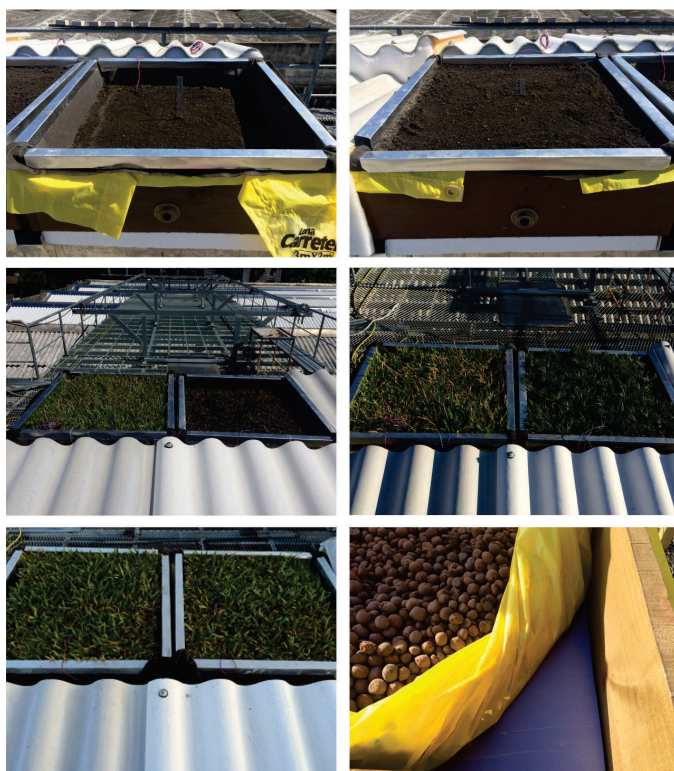


FIGURA 2 — Da esquerda para a direita e de cima para baixo: amostra com 5cm de substrato e 15cm de substrato, amostras com e sem vegetação, amostras com diferentes tipos de grama, amostras com e sem isolamento térmico, e detalhe do isolamento térmico. **Fonte:** Acervo pessoal dos autores (2016).

QUADRO 1 — Etapas de medição com variação das camadas nas amostras de telhado verde.

Etapa	Amostra 1	Amostra 2
Etapa 1 (12 a 16 fev. 2016)	Substrato úmido com 5cm de espessura	Substrato úmido com 15cm de espessura
Etapa 2 (11 a 15 mar. 2016)	Substrato úmido com 10cm de espessura + vegetação (grama Sempre Verde - <i>Axonopus compressus</i>)	Substrato úmido com 10cm de espessura
Etapa 3 (18 a 22 mar. 2016)	Substrato úmido com 10cm de espessura + vegetação (grama Sempre Verde - <i>Axonopus compressus</i>)	Substrato úmido com 10cm de espessura + vegetação (grama Preta - <i>Ophiopogon japonicus</i>)
Etapa 4 (11 a 15 mai. 2016)	Substrato úmido com 10cm de espessura + vegetação (grama Sempre Verde - <i>Axonopus compressus</i>) + isolamento térmico	Substrato úmido com 10cm de espessura + vegetação (grama Sempre Verde - <i>Axonopus compressus</i>)

Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

O isolante térmico utilizado na Etapa 4 foi poliestireno extrudado – XPS 25mm, o qual foi colocado entre o componente estrutural e a impermeabilização. A camada vegetal adotada nas duas amostras dessa etapa foi do tipo gramínea (grama Sempre Verde) por ser uma solução economicamente viável e de fácil aplicação.

Em todas as etapas de ensaio, os dados foram comparados com uma cobertura de telha de fibrocimento 6mm.

PARÂMETROS PARA ANÁLISE DE MEDIÇÕES: FATOR DECREMENTAL E ATRASO TÉRMICO

Para analisar as medições observadas e avaliar o desempenho térmico de cada etapa, foram utilizados os parâmetros de Fator Decremental (f) e Atraso Térmico (Φ) que estão associados à inércia térmica, características do telhado verde. O fator decremental é a razão entre a amplitude de temperatura na superfície de contato superior do componente estrutural e a amplitude de temperatura externa para um período de 24 horas (Equação 1). Já o atraso térmico se caracteriza pelo intervalo de tempo entre a hora da temperatura máxima na superfície de contato superior do componente estrutural (laje) e a hora da temperatura máxima do ambiente externo (Equação 2).

$$\text{Equação 1} \quad f = \frac{T_{\text{sup máx}} - T_{\text{sup mín}}}{T_{\text{ext máx}} - T_{\text{ext mín}}}$$

Onde:

f = Fator decremental

$T_{sup\ máx}$ = Temperatura máxima na superfície da laje (°C)

$T_{sup\ mín}$ = Temperatura mínima na superfície da laje (°C)

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

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

$$\text{Equação 2} \quad \varphi = t_{T\ sup\ máx} - t_{T\ ext\ máx}$$

Onde:

φ = Atraso térmico

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

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

Esses parâmetros foram aplicados em cada etapa de medição mencionada na sessão “Etapas de Medição” como método de avaliação da capacidade de armazenamento de calor.

RESULTADOS

Em cada uma das etapas de medição apresentadas na sessão “Etapas de Medição”, os dados de fluxo de calor e temperaturas superficiais das amostras foram analisados e comparados com as condições climáticas pertinentes para cada caso.

ANÁLISE DO FLUXO DE CALOR

A Figura 3 apresenta as medições de fluxo de calor na amostra de fibrocimento (cinza) e para cada uma das etapas do ensaio: variação na espessura de substrato (tons vermelhos), comparação com e sem vegetação (tons amarelos), diferentes tipos de grama (tons verdes) e comparação com e sem isolamento térmico (tons azuis). Ademais, a série em roxo apresenta a quantidade de chuva registrada em cada etapa de ensaio.

A partir da pluviometria observada é possível comprovar que todos os ensaios foram realizados em condições de pouca chuva, isto é, sem alterações importantes e repentinas na saturação de água nas amostras, com exceção do fim da Etapa 1 e no início da Etapa 2 em que a precipitação um pouco mais prolongada permite explicar a queda brusca no fluxo de calor principalmente nos casos com telha de fibrocimento e substrato de 5cm.

Para a Etapa 1 observa-se nas curvas de fluxo de calor da cobertura com 5 cm de substrato um comportamento com oscilações rápidas e picos elevados semelhantes às variações registradas na amostra com fibrocimento. A amostra com 15cm de substrato

apresentou curvas mais uniformes, destacando os efeitos da maior inércia térmica alcançada no aumento da espessura do substrato. Nesta etapa a amostra com 15cm de substrato apresenta um fluxo de calor máximo, em média, 55% menor do que a amostra com 5cm de substrato.

Na Etapa 2 a importância da presença de vegetação no telhado verde é evidente. A amostra com vegetação mostra a maior redução nos picos de ganho de calor com oscilações moderadas em torno da condição adiabática. A diferença entre o ganho de calor máximo registrado nas amostras de telhado verde com e sem vegetação foram em média de 84,1% e 63,0% menores respectivamente, em comparação com a cobertura de fibrocimento. Comparando as amostras com e sem vegetação, o percentual de redução máximo foi encontrado no terceiro dia de ensaio, quando a umidade relativa do ar registrada foi menor (52,7%). O fluxo de calor máximo na amostra sem vegetação foi, em média, 58,4% maior em relação a amostra com vegetação.

A Etapa 3 foi realizada em condições de clima mais quente se comparado com a etapa anterior (na Etapa 3 foi possível observar que a radiação solar apresentou pico entre 1000 e 1200W/m²). Assim, é possível destacar o benefício em termos de redução de ganho de calor que apresenta uma configuração completa de telhado verde frente a um sistema com telha de fibrocimento comumente encontrada na construção civil. A diferença entre o fluxo de calor máximo registrado nas amostras de telhado verde com diferentes camadas vegetais foi em média de 76,0% e 88,5% menor para grama Sempre Verde e grama Preta, respectivamente, em comparação com a cobertura de fibrocimento. Em termos absolutos, a maior diferença foi encontrada nos picos de calor do quinto dia de medição (quando a umidade relativa do ar registrada foi menor (46,4%) e a temperatura

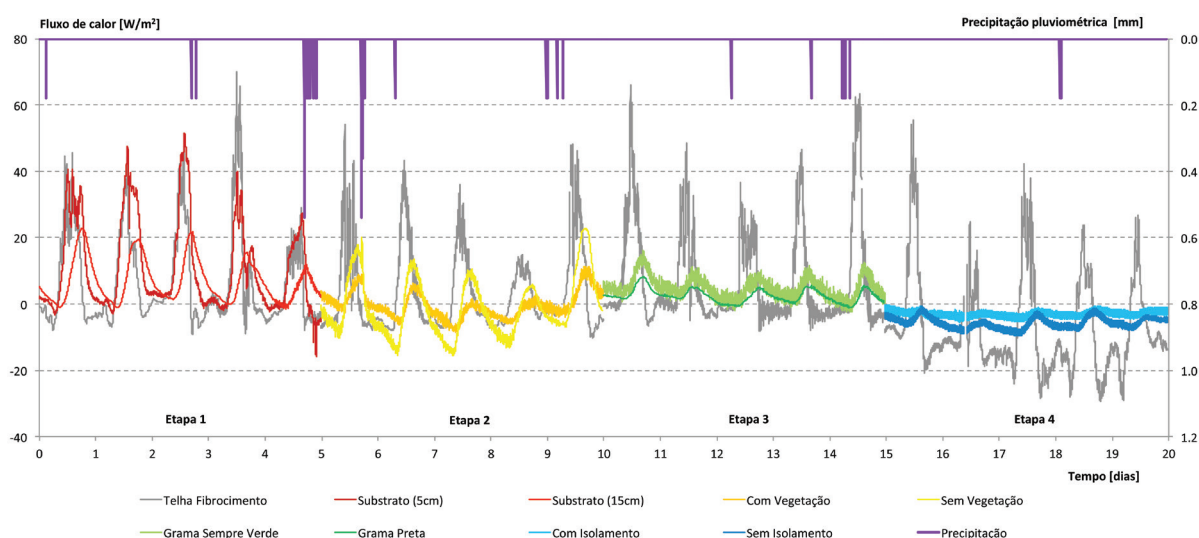


FIGURA 3 — Fluxo de calor e pluviometria registrados durante os ensaios.

Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

do ar externo foi de 26,6°C), em que o fluxo de calor máximo registrado para a cobertura com telha de fibrocimento foi de 63,4W/m², enquanto que para as amostras de telhado verde esse fluxo foi de 12,5W/m² para a grama Sempre Verde e 5,5W/m² para a grama Preta. Adicionalmente, foi observado um comportamento térmico análogo entre os dois tipos de grama na configuração de telhado verde, sendo que a medição na grama Sempre Verde mostrou um ruído um pouco maior no sinal registrado, possivelmente por alguma condição na montagem do ensaio. No entanto, a diferença no fluxo de calor máximo entre as amostras de telhado verde também foi alta. A amostra com grama Preta apresentou um fluxo de calor 52,2% menor, em média, em relação à amostra com grama Sempre Verde. Possivelmente esse resultado está associado às diferentes configurações físicas das plantas, como taxa de evapotranspiração ou índice de área foliar, entre outros.

Para a Etapa 4 as condições climáticas apresentaram grande variação quando comparado às etapas anteriores. A temperatura média do ar externo para os cinco dias de medição foi de 20,2°C, ou seja, menor do que a temperatura do ar no interior da bancada. Nesta etapa o valor médio calculado para a redução de picos de calor teve um resultado dentro da mesma ordem de grandeza que na Etapa 3. A diferença entre o fluxo de calor máximo registrado nas amostras de telhado verde com e sem isolamento térmico foi em média de 79% e 66%, respectivamente, em comparação com a cobertura de referência. Isso poderia indicar que o isolamento térmico não teve maior influência na configuração de um telhado verde completo. As amostras de telhado verde apresentaram fluxo negativo em toda esta etapa, essa perda constante de calor é decorrente de a temperatura média do ar no interior da bancada ser superior à temperatura do ar externo, resultando assim um fluxo ascendente.

De forma geral, observando a Figura 3 como um todo é possível identificar que a sequência de ensaio proposta, que segue a sequência construtiva de um telhado verde, mostra a importância de cada uma das camadas em irem gradativamente reduzindo os picos de ganho de calor. Desde a amostra com 5cm de substrato sem vegetação, que acompanha o comportamento térmico do telhado de fibrocimento, até a configuração completa de telhado verde com uma redução significativa nos momentos de maior calor.

O balanço de energia total para os períodos de medição mais quentes (Etapa 1 e Etapa 3) pode ser observado na Figura 4. Para todos os casos dessas duas etapas o balanço mostra valores positivo, isto é, o ganho de calor nos cinco dias foi maior que as perdas de calor no período da noite. A configuração de telha de fibrocimento teve um ganho de calor semelhante nas duas etapas e um desempenho melhor que a configuração com substrato de 5cm, em função da câmara de ar entre as telhas de fibrocimento e a laje de concreto, que oferecem uma maior resistência térmica se comparado com os 5cm de substrato. As duas configurações de telhado verde apresentaram um melhor desempenho térmico com reduções de 32,8% para a grama Sempre Verde e de 65,9% para a grama Preta em comparação com a telha de fibrocimento.

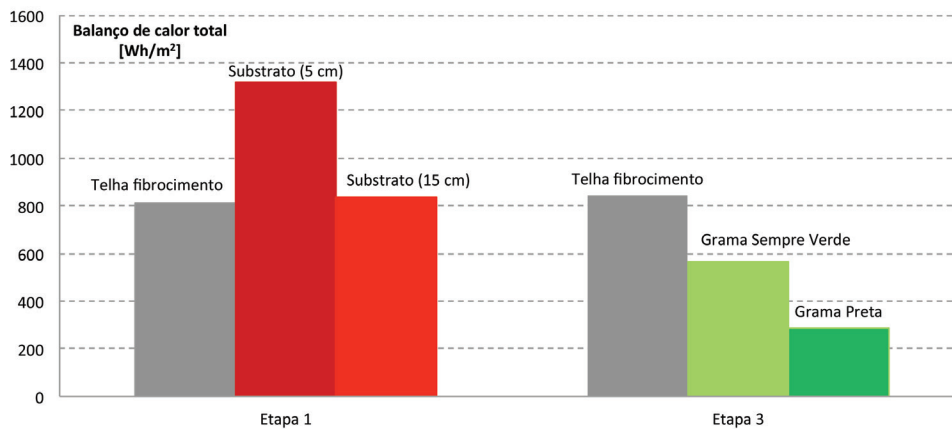


FIGURA 4 — Balanço de calor total para a Etapa 1 e Etapa 3 de medição.
Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

ANÁLISE DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS

A Figura 5 apresenta as medições de temperatura na laje da amostra de fibrocimento (cinza) e para cada uma das etapas do ensaio: variação na espessura de substrato (tons vermelhos), comparação com e sem vegetação (tons amarelos), diferentes tipos de grama (tons verdes) e comparação com e sem isolamento térmico (tons azuis). Adicionalmente, a série em roxo apresenta temperatura de bulbo seco (temperatura do ar) em cada etapa de ensaio.

Como primeira observação durante todo o período de ensaios, é possível destacar que a temperatura na laje sob a telha de fibrocimento acompanha de forma bem próxima as variações da temperatura do ar para os dias mais quentes. Apenas na Etapa 4, na qual as condições foram de temperaturas mais amenas, a configuração com telha de fibrocimento mostrou temperaturas sempre acima das condições ambientais.

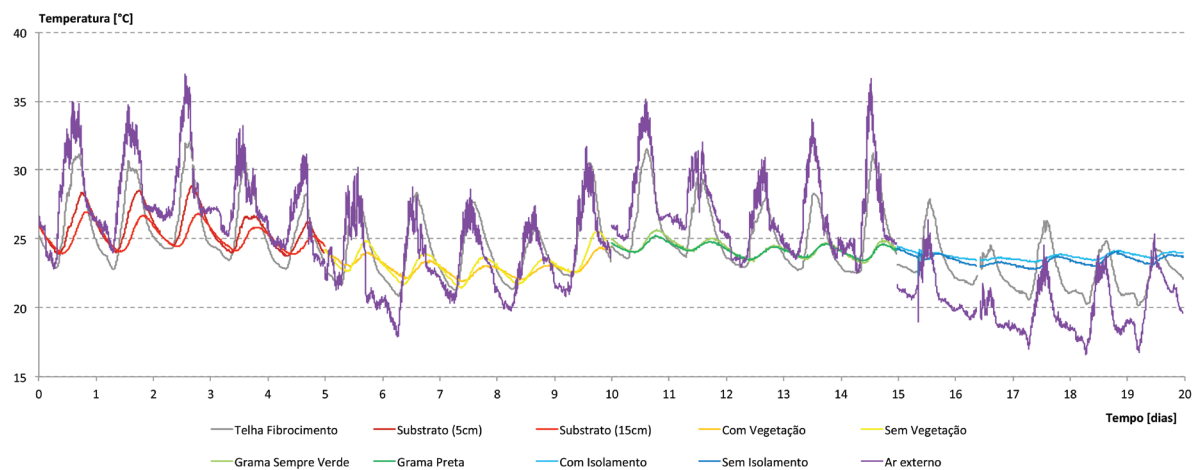


FIGURA 5 — Temperatura na laje e temperatura do ar registradas durante os ensaios.
Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

Analisando mais em detalhe cada uma das etapas do experimento, observa-se na Etapa 1 que a configuração com menor espessura de substrato (5cm) apresenta oscilações maiores se comparada com a configuração com 15cm de substrato. Isso destaca a participação da inércia térmica presente na terra usada para compor o substrato. Na superfície da laje, a maior diferença entre as temperaturas médias foi registrada no terceiro dia de medição, sendo 0,8°C maior na amostra com 5cm de substrato, em comparação com a amostra com 15 cm de substrato. Essas diferenças acabam sendo mais acentuadas se comparadas com a temperatura da configuração com telha de fibrocimento.

Na Etapa 2, observa-se um leve amortecimento da oscilação de temperaturas entre as amostras com e sem vegetação. A diferença entre a temperatura média na laje das amostras de telhado verde com e sem cobertura vegetal foi 0,2°C, em média, para o período analisado. Considerando as temperaturas de pico essa diferença foi de 1,2°C no último dia desta etapa quando a temperatura do ar externo também foi maior.

Nessa etapa, é pertinente mostrar o detalhe das temperaturas na laje e no substrato, conforme a Figura 6. As duas sequências com linhas tracejadas mostram a temperatura na superfície externa do substrato e a importância da presença de vegetação é evidente. Para a amostra sem a proteção solar da vegetação, a temperatura no substrato chega a ultrapassar a temperatura do ar nos momentos de maior calor. Por outro lado, a amostra que considera o sombreamento da vegetação sobre o substrato apresentou temperaturas superficiais sempre abaixo da temperatura do ar e inclusive próximas às temperaturas da laje nos dias 3 e 4, com condições meteorológicas mais amenas. Durante o período da noite, as temperaturas nas superfícies do substrato apresentaram valores abaixo das temperaturas da laje, em função das perdas de calor radiativas.

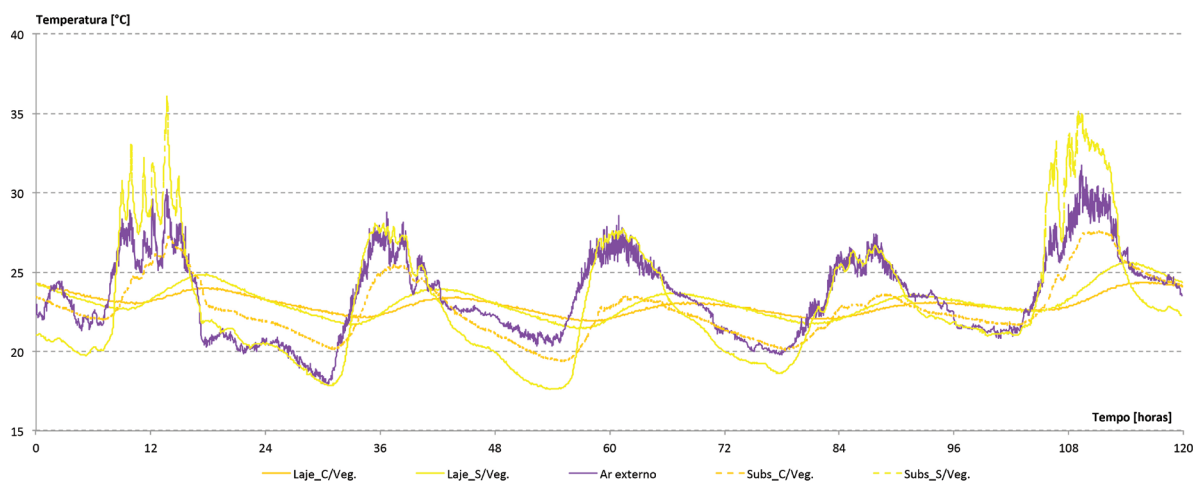


FIGURA 6 — Temperaturas na laje e no substrato registradas durante a Etapa 2.
Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

Na Etapa 3, apresentada na Figura 5, observa-se pouca diferença em termos de variação de temperatura na laje entre as amostras com alteração no tipo de vegetação, sendo que a grama Preta apresentou temperatura média $0,1^{\circ}\text{C}$ menor, em média, em relação a grama Sempre Verde. Comparando a temperatura média na laje com a temperatura média do ar externo, o amortecimento médio foi de $2,6^{\circ}\text{C}$ para a grama Sempre Verde e $2,7^{\circ}\text{C}$ para a grama Preta.

Nessa etapa foi realizado o registro termográfico com a câmera ThermoCAM E25, conforme mostra a Figura 7, com o objetivo de verificar variações na temperatura da camada vegetal. Por meio do registro foi possível observar que a distribuição da temperatura nas duas superfícies não foi uniforme. Essa variação pode ser resultado das diferentes configurações físicas das plantas e da quantidade de folhas em uma determinada área, ficando o substrato mais ou menos exposto.

Durante a Etapa 4, a temperatura do ar externo se manteve abaixo da temperatura interna de *setpoint* ($23,5^{\circ}\text{C}$), o que obrigou ao sistema controlador PID a manter o aquecimento acionado na maior parte do período de medição. Nessas condições, é possível observar o efeito do isolante térmico em que a amostra teve uma resistência térmica maior para liberar o calor gerado internamente e manteve uma temperatura constante na laje (média $23,8^{\circ}\text{C}$ e desvio de $0,2^{\circ}\text{C}$) muito próxima do valor de *setpoint* imposto pelo sistema de aquecimento. No caso da amostra sem isolamento térmico, observa-se uma temperatura da laje um pouco mais baixa, tentando se aproximar das condições externas de temperatura, mostrando inclusive uma leve oscilação que acompanha as variações dia-noite. Esse resultado permite destacar o efeito da inércia térmica no telhado verde para condições de climáticas moderadamente frias com um ganho de calor interno constante.

Por último, analisando o comportamento das temperaturas para os períodos mais quentes (Etapa 1 e Etapa 3), é possível observar a importância da vegetação na composição do telhado verde para a redução das temperaturas. A Figura 8 apresenta a correlação

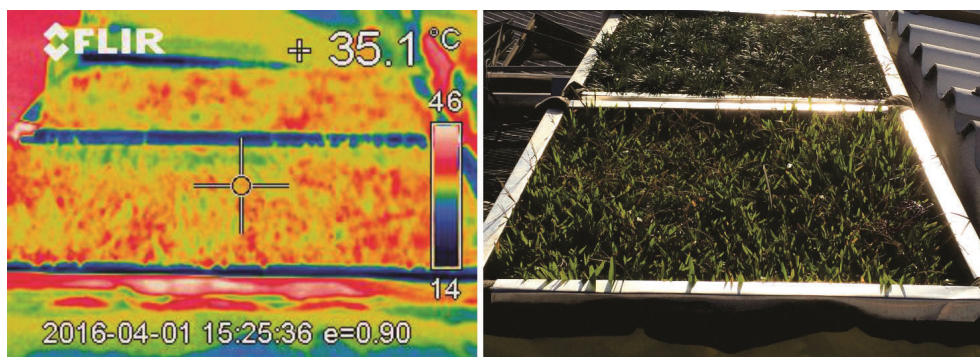


FIGURA 7 — Comparação entre a termografia, à esquerda, e a fotografia da cobertura vegetal com grama Sempre Verde e grama Preta.

Fonte: Acervo pessoal dos autores (2016).

que existe entre as temperaturas do ar externo com as temperaturas registradas na superfície da laje para dois períodos de medição em momentos diferentes. A linha azul indica a fronteira em que a temperatura na laje é igual à temperatura do ar. Assim, os pontos acima da linha azul indicam momentos em que a temperatura da laje esteve acima da temperatura do ar. Nos ensaios realizados, esse fenômeno aconteceu principalmente no período da noite (Figura 5) e não foram observadas grandes diferenças entre as duas etapas. Para a Etapa 1 (substratos sem vegetação), 17% dos pontos estão acima da linha azul, enquanto para a Etapa 3 foram identificados 12% dos pontos. No entanto, para a faixa em que a temperatura do ar está entre 25°C e 40°C, podem acontecer situações de desconforto térmico, pois as amostras com vegetação no telhado verde conseguem manter a temperatura na laje abaixo dos 25°C, enquanto as amostras sem vegetação (tons vermelhos) apresentam valores entre 25°C e 30°C.

VERIFICAÇÃO DO FATOR DECREMENTAL E ATRASO TÉRMICO

Os parâmetros Fator Decremental (f) e Atraso Térmico (φ) foram aplicados em cada etapa de medição como método de avaliação da capacidade de armazenamento de calor do telhado verde. Os resultados apresentados na Tabela 2 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 1, apresentada na sessão “Parâmetros para análise de medições: Fator Decremental e Atraso Térmico”, o fator decremental é diretamente proporcional à amplitude de temperatura na superfície de contato, ou seja, quanto maior a variação na temperatura

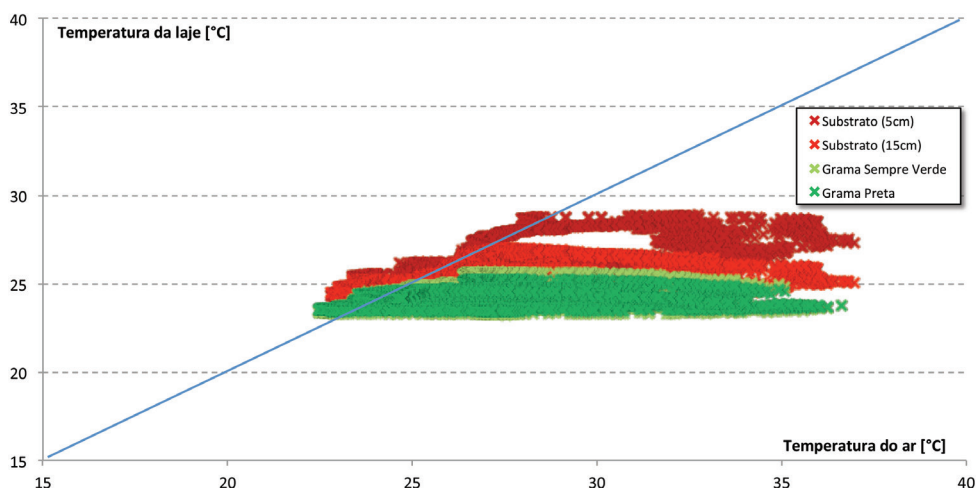


FIGURA 8 — Correlação de temperatura do ar e temperatura na laje para a Etapa 1 e Etapa 3.
Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

da superfície, maior o fator decremental. Por outro lado, o atraso térmico indica o tempo transcorrido entre o registro da temperatura máxima do ar externo e o registro da temperatura máxima na superfície superior do componente estrutural.

A Tabela 2 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.

Os resultados mais significativos nos parâmetros analisados são apontados pela variável espessura. O aumento da camada de substrato de 5cm para 15cm 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 à cobertura de referência, o amortecimento chega a 77%. As temperaturas médias na superfície de contato da cobertura de referência, telhado verde com vegetação e cobertura sem vegetação foi de 25,4°C, 23,3°C e 23,8°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 tem-

TABELA 2 — Resultados encontrados para Fator Decremental (f) e Atraso Térmico (φ).

Variável	Configuração das amostras	f	φ
Espessura (14 fev. 2016)	Telha Fibrocimento	0,728	1,68
	Substrato 5cm	0,403	2,58
	Substrato 15cm	0,229	4,77
Vegetação (15 mar. 2016)	Telha Fibrocimento	0,761	1,28
	Substrato com Vegetação	0,169	5,95
	Substrato sem Vegetação	0,290	5,10
Tipo de vegetação (22 mar. 2016)	Telha Fibrocimento	0,614	1,00
	Gramma Sempre Verde	0,118	4,87
	Gramma Preta	0,088	4,87
Isolamento térmico (11 maio 2016)	Telha Fibrocimento	0,484	0,18
	Telhado Verde com Isolante	0,059	7,47
	Telhado Verde sem Isolante	0,084	7,92

Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

peratura na mesma superfície. O tipo de vegetação utilizado não apresentou efeito para o parâmetro atraso térmico, e apresentou pouco efeito para o fator decremental.

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 22,3°C, 23,9°C e 23,5°C, respectivamente. Considerando uma situação de frio, é favorável que a cobertura mantenha uma temperatura mais elevada, indicando maior resistência à perda de calor.

CONCLUSÃO

Nos países onde a intensidade da radiação solar horizontal é alta, como ocorre em grande parte do território brasileiro, a cobertura se torna o principal elemento da envoltória pela qual grande parte do calor é transferido aos ambientes internos adjacentes. Considera-se que o objetivo geral do trabalho foi atingido satisfatoriamente, porque permite analisar o comportamento térmico do telhado verde a partir de uma comparação com amostras que representam diferentes composições construtivas de coberturas. O procedimento adotado nesta pesquisa foi do tipo experimental, a partir da construção de uma bancada, com temperatura interna controlada artificialmente, sobre a qual foram instaladas as lajes de concreto que suportavam as amostras.

Por meio das medições observadas é possível concluir que, para o clima no qual ocorreram os ensaios, o telhado verde apresenta uma importante redução no ganho de calor se comparado com um sistema convencional de telha de fibrocimento. Assim, o telhado verde pode ser uma solução construtiva adequada em termos de conforto térmico e redução do consumo energético.

Das diversas composições de camadas analisadas nas amostras de telhado verde, observou-se significativa contribuição na redução da transferência de calor a partir da variação da espessura do substrato. A presença da camada vegetal se mostrou eficaz tanto na diminuição da taxa de calor absorvido pela cobertura durante o dia quanto na redução da taxa calor perdido durante a noite.

As amostras de telhado verde também apresentaram resultados favoráveis no controle da temperatura superficial, mantendo a superfície de contato superior do componente estrutural a temperaturas próximas de 23°C e 24°C.

Os parâmetros fator decremental e atraso térmico, possibilitaram identificar duas variáveis de impacto significativo na capacidade de armazenamento de calor do telhado verde para a cidade onde os ensaios foram realizados. 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 à 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.

NOTA

- 1 Artigo elaborado a partir da dissertação de mestrado de D.S. LIZ intitulada “Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis”. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 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: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.575-5: edificações habitacionais: desempenho: parte 5: requisitos para sistemas de cobertura. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- BRASÍLIA. Lei nº 5.965, de 16 de agosto de 2017. Cria o programa IPTU Verde, que dispõe sobre a redução no Imposto Predial e Territorial Urbano - IPTU como incentivo ambiental destinado a proteger, preservar e recuperar o meio ambiente. *Diário Oficial do Distrito Federal*, Brasília, 2017. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=348217>>. Acesso em: 15 nov. 2017.
- 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 maio 2015.
- CARTER, T.; FOWLER, L. Establishing green roof infrastructure through environmental policy instruments. *Environmental Management*, v.42, p.151-164, 2008.
- DORNELLES, K.A. *Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA*. 2008. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- 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, 2012. Edição 5500, p.2. Disponível em: <<http://leismunicipa.is/jmacq>>. Acesso em: 30 maio 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. 106 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) — 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. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. *Requisitos técnicos da qualidade para o nível de eficiência energética de edificações residenciais: RTQ-R*. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012.
- 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. *Imprensa Oficial da Estância Turística de Itu*, Itu, 2013. Disponível em: <<http://leismunicipa.is/cmtdr>>. Acesso em: 30 maio 2015.
- JIM, C.Y.; HE, H. Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem. *Ecological Engineering*, v.36, n.8, p.1052-1063, 2010.
- JIM, C.Y.; PENG, L.L.H. Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof. *Urban Forestry and Urban Greening*, v.11, n.1, p.73-85, 2012.

JOHN, V.M.; SAVASTANO JUNIOR, H. *Perspectivas do fibrocimento sem amianto no Brasil*. Folha de São Paulo, 8 fev. 2014. Opinião. 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.

MACHADO, M.V. *et al.* El cálculo de la conductividad térmica equivalente en la cubierta ecológica. *Ambiente Construído*, v.3, n.3, p.65-76, 2003.

MATHEUS, C. *et al.* Desempenho térmico de envoltórias vegetadas em edificações no sudeste brasileiro. *Ambiente Construído*, v.16, n.1, p.71-81, 2016.

MICHELS, C. *et al.* Evaluation of heat flux reduction provided by the use of radiant barriers in clay tile roof. *Energy and Buildings*, v.40, n.4, p.445-451, 2008.

NARDINI, A. *et al.* 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, n.3, p.697-708, 2012.

OULDBOUKHITINE, S.E. *et al.* Assessment of green roof thermal behavior: a coupled heat and mass transfer model. *Building and Environment*, v.46, n.12, p.2624-2631, 2011.

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

PEREIRA, C.D. *Influência da refletância e da emitância de superfícies externas no desempenho térmico de edificações*. 2014. 207 f. Tese (Doutorado 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.

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 maio 2015.

SAILOR, D.J. A green roof model for building energy simulation programs. *ScienceDirect*, v.40, n.8, p.1466-1478, 2008.

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, n.9, p.1781-1788, 2007.

SILVA, A.S. *et al.* Decision-Making Process for Improving Thermal and Energy Performance of Residential Buildings: A Case Study of Constructive Systems in Brazil. *Energy and Buildings*, v.128, n.18, p.270-286, 2016.

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, n.1, p.173-177, 2008.

SQUIER, M.; DAVISDON, C. I. Heat flux and seasonal thermal performance of an extensive green roof. *Building and Environment*, v.107, n.10, p.235-244, 2016.

TABARES-VELASCO, P.C.; SREBRIC, J. A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer condition. *Building and Environment*, v.49, n.3, 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, n.8, p.2971-2979, 2007.

WEBER, F. *et al.* *Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus*. Florianópolis: UFSC, 2017. Disponível em: <<http://labeee.ufsc.br/publicacoes/relatorios-de-pesquisa>>. Acesso em: 6 set. 2017.

ZHAO, M. *et al.* Effects of plant and substrate selection on thermal performance of green roof during the summer. *Buildings and Environment*, v.78, n.8, p.199-211, 2014.

DÉBORA STIEGEMEIER DE LIZ | ORCID iD: 0000-0002-0858-7008 | Universidade Federal de Santa Catarina | Centro Tecnológico | Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Florianópolis, SC, Brasil.

MARTIN ORDENES | ORCID iD: 0000-0002-6876-7713 | Universidade Federal de Santa Catarina | Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo | Campus Trindade, 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil | Correspondência para/Correspondence to: M. ORDENES | E-mail: <martin@arq.ufsc.br>.

SAULO GUTHS | ORCID iD: 0000-0001-5754-615X | Universidade Federal de Santa Catarina | Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo | Florianópolis, SC, Brasil.

COLABORADORES

Todos os autores contribuíram na concepção e desenho do estudo, análise de dados e redação final.

Como citar este artigo/How to cite this article

LIZ, D.S. *et al.* Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis. *Oculum Ensaios*, v.15, n.2, p.315-333, 2018. <http://dx.doi.org/10.24220/2318-0919v15n2a4053>

Recebido em
14/9/2017,
reapresentado
em 21/11/2017
e aprovado em
26/1/2018.