



ARTIGO CIENTÍFICO

Telhados verdes como alternativa para construções sustentáveis

Green roofs as an alternative to sustainable buildings

Ana Julia Frizon¹, Pedro Henrique Branco Lázaro², Eloísa Dezen Kempter³, Felipe Benavente Canteras⁴

Resumo: O telhado verde tem sido considerado como alternativa para mitigar alguns problemas ambientais presentes nos centros urbanos, como enchentes, poluição do ar e sonora, e ilhas de calor. Além disso, pode atuar como isolante térmico em edifícios proporcionando conforto térmico e economia de energia. Entretanto, uma das desvantagens é o seu elevado custo de implantação. Este trabalho apresenta uma pesquisa experimental realizada em Limeira, São Paulo, com o objetivo de avaliar dois aspectos de telhados verdes: seu custo de implantação e seu desempenho como isolante térmico na região de estudo. Para a composição de preços, foram considerados os principais sistemas construtivos de telhado verde, orçados por m² em empresas especializadas e como materiais unitários no comércio local, obtendo-se variações de valor de até 835%. Para a análise de desempenho térmico, foram construídos três módulos experimentais (M), sendo o M1 apenas com laje de concreto impermeabilizada (telhado de controle), e os outros dois com sistemas de telhado verde extensivo: o M2 utilizando *Chlorophytum comosum* e o M3 com *Hemigraphis alternata*. O controle de temperatura e umidade interior e exterior nos módulos foi realizado com termohigrômetros (Testo 174 h data logger) a partir de medições a cada 10 minutos durante 40 dias. Com esta análise pode-se atestar o melhor desempenho térmico das coberturas vegetadas (M2 e M3), que apresentaram temperaturas máximas até 3,4°C inferiores àquelas do M1 (controle). Conclui-se que, apesar do custo de implantação ainda ser elevado, o telhado verde, é viável, pois possui benefícios ambientais e de conforto térmico e pode levar à diminuição do consumo de energia elétrica.

Palavras-chave: Cobertura Sustentável; Variação de Custo; Conforto Térmico; Construções Sustentáveis.

Abstract: The green roof has been considered as an alternative to mitigate some environmental problems present in urban centers, such as floods, air pollution and noise, and islands of heat. Besides, it can act as thermal insulation in buildings providing thermal comfort and energy saving. However, one of the downsides is its high cost of implementation. This work presents experimental research carried out in Limeira, São Paulo, with the objective of evaluating two aspects of green roofs: its cost of implantation and its performance as thermal insulation in the study region. For the composition of prices, the widely used green roof construction systems were considered, estimated by square meter in specialized companies and as unitary materials in local commerce, presenting value variations of up to 835%. For the thermal performance analysis, three experimental modules (M) were built. The M1 has only a waterproofed concrete slab (control roof), and the other two have extensive green roof systems: M2 using *Chlorophytum comosum*, and M3 with *Hemigraphis alternata*. The control of the indoor and outdoor temperature and humidity in the modules was carried out with thermohygrometers (Testo 174 h data logger) in measurements every 10 minutes for 40 days. With this analysis, we verified that the vegetated coverings (M2 and M3) presented the best thermal performance with the maximum temperatures up to 3.4 °C lower than those of M1 (control). We concluded that, although the implantation cost is still high, the green roof is feasible, because it has environmental benefits and thermal comfort and can lead to a decrease in the consumption of electric energy.

Key words: Sustainable Roof; Cost variation; Thermal comfort; Sustainable buildings.

*Autor para correspondência

Recebido para publicação em 02/10/2018; aprovado em 22/11/2018

¹Graduanda em Tecnologia em Construção de Edifícios, Faculdade de Tecnologia/Universidade Estadual de Campinas, Limeira. Telefone (19) 98134-0010, anajfrizon@gmail.com

²Mestrando em Tecnologia, Faculdade de Tecnologia/Universidade Estadual de Campinas, Limeira. Telefone (19) 98171-0179, pedrolazaro3@gmail.com

³Professora Doutora, Faculdade de Tecnologia/Universidade Estadual de Campinas, Limeira. Telefone (19) 2113-3415, e-mail: elo@ft.unicamp.br

⁴Professor Doutor, Faculdade de Tecnologia/Universidade Estadual de Campinas, Limeira. Telefone (19) 2113-3404, e-mail: felippe.canteras@ft.unicamp.br



INTRODUÇÃO

A revolução industrial levou à formação de grandes centros urbanos e populacionais, na maioria das vezes criados sem planejamento e com poucas áreas verdes (SPOSITO, 2000). Problemas ambientais como a poluição do ar, solo e água, escassez de água de boa qualidade, ocorrência de enchentes, ilhas de calor, entre outros, podem estar relacionados à ocupação desordenada do solo, ao elevado número de indústrias e à ausência de espaços verdes (PAULA, 2004; SANTOS, 2012).

As ilhas de calor são anormalidades térmicas, em que a temperatura dos grandes centros urbanos é maior do que áreas vizinhas, devido à substituição de materiais naturais pelos urbanos (concreto e asfalto). Esta elevação da temperatura nas cidades altera a circulação dos ventos, a umidade e as chuvas, devido à evaporação rápida da água e a poluição lançada na atmosfera pelos carros e indústrias (PAULA, 2004). O efeito das ilhas de calor é um agravante às condições térmicas encontradas no interior das edificações, principalmente em grandes centros urbanos, diminuindo a qualidade de vida dos habitantes destas edificações.

Dessa forma, é crescente a busca por alternativas que solucionem ou minimizem esses problemas. Uma destas alternativas são os telhados verdes, compostos por diversas camadas com diferentes funções, como impermeabilização da laje, barreira radicular (sistema anti-raiz), sistema de drenagem, filtro, solo, substrato e vegetação (TAM et al., 2016). Os telhados verdes são coberturas vegetadas que auxiliam no processo de isolamento térmico e podem ser classificados de acordo com o porte das espécies vegetais utilizadas: plantas de porte baixo ou rasteiras caracterizam os telhados verdes extensivos e espécies de porte médio e arbóreo caracterizam os telhados verdes intensivos.

Além da vista arquitetônica, os telhados ecológicos prestam serviços ambientais, como filtrar a poluição do ar (ABHIJITH et al., 2017; MOGHBEL, SALIM, 2017; BESIR; CUCE, 2018), minimizar os efeitos de ilhas de calor (AFLAKI et al., 2017; BESIR; CUCE, 2018), aumentar a umidade do ar (MOGHBEL; SALIM, 2017), atuar como isolantes acústicos (RENTERGHEM, 2018) e gerar economia de energia (RAN; TANG, 2017; BESIR; CUCE, 2018), sendo portanto uma alternativa para gerar bem estar aos seres humanos e melhorar sua condição de vida em grandes cidades. Em áreas urbanas, altamente impermeáveis, a utilização dos telhados vegetados diminui e retarda o escoamento superficial proveniente de precipitações, uma vez que aumenta a superfície permeável, prevenindo e evitando a formação de enchentes (CARPENTER et al., 2016; VIJAYARAGHAVAN, 2016; ZHANG et al., 2018; PALLA; GNECCO, 2018).

Em relação aos resultados obtidos em artigos relacionados ao isolamento térmico de sistemas verdes, os telhados ecológicos extensivos com até 20 cm de espessura apresentaram diferenças de até 2,1 °C e para coberturas intensivas até 3,4 °C na China (TAM et al., 2016), variando a até 4,4 °C na Índia (KUMAR, MAHALLE, 2016), quando comparados com lajes impermeabilizadas sem isolante térmico.

Apesar da existência de pesquisas internacionais que indicam que os telhados verdes melhoram o conforto térmico no

interior das edificações (KIM et al., 2016; SQUIER, DAVIDSON, 2016), a maioria delas desenvolvida em países de climas mais amenos, poucas pesquisas foram realizadas no Brasil sobre o impacto causado pelos telhados vegetados na temperatura e na umidade do ar dentro da edificação, quando comparado com as coberturas convencionais.

O mesmo ocorre com relação aos custos de implantação do telhado verde, sendo escassos na literatura valores fidedignos à realidade brasileira. O custo de implantação do telhado verde é variável dependendo da região, mão de obra especializada, disponibilidade de materiais e do tipo de telhado (BEATRICE, 2011).

Tendo em vista o cenário descrito, objetivou-se analisar o custo e desempenho térmico de sistemas de telhados verdes extensivos, avaliando a influência da cobertura vegetal no conforto térmico das edificações por meio de dados de temperatura e umidade dentro e fora dos módulos, coletados de forma contínua durante parte do verão e do outono na cidade de Limeira, São Paulo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

O município de Limeira está localizado no centro-oeste do Estado de São Paulo, a 154 km da capital (São Paulo), em latitude S 22° 33' 53" e longitude W 47° 24' 06", com uma área total de aproximadamente 581 km², sendo 127 km² de área urbana com uma população de aproximadamente 303.682 habitantes (IBGE, 2018).

Em relação ao clima, o município insere-se na zona subtropical úmida, caracterizado como tropical de altitude, com invernos secos e verões quentes. Segundo o Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI, 2018), o clima de Limeira é do tipo Aw, denominado como clima tropical de savanas, com intensas chuvas no verão e invernos secos. Ao longo do ano, as temperaturas variam de 12 °C a 30 °C e dificilmente é inferior a 8 °C e superior a 34 °C. Tem precipitação média anual de 1.312 mm, e no mês mais seco, esta é inferior a 60 mm (WEATHERS PARK, 2018). De acordo com o Centro Integrado Informações Agrometeorológicas (CIAGRO, 2018), janeiro é o mês com maior incidência de chuva, com média de 244,3 mm, e julho é o mês com menor incidência de chuva, a qual possui uma média de 24,7 mm.

Levantamento de Custos

Através de revisão de literatura foi possível definir as principais variáveis construtivas dos telhados verdes extensivos, desde os mais simples até os mais complexos, sendo possível listar os principais materiais utilizados na construção. Posteriormente foi realizada a consulta a 77 lojas de diversas áreas de comércio (sendo elas floriculturas, lojas de impermeabilizantes, lojas de materiais de construção, e outras áreas correlatas), orçando todos os materiais utilizados, a fim de realizar o levantamento de custo médio de implantação do telhado verde por metro quadrado. Foram consultadas ainda 05 empresas especializadas em instalação de telhados verdes, obtendo-se o custo por metro quadrado e os materiais utilizados para a construção. Os orçamentos foram realizados no estado de São Paulo.

De acordo com as variáveis construtivas possíveis para um telhado verde, foram selecionados 4 tipos de construção, variando das mais simples, que apresentam os componentes mínimos necessários para o bom funcionamento da cobertura verde, até as mais complexas, que incluem um maior número de camadas e componentes: Modelo 01: impermeabilizante, drenagem, substrato e vegetação; Modelo 02: impermeabilizante, drenagem, módulos, substrato e vegetação; Modelo 03: impermeabilizante, drenagem, membrana alveolar, módulos, substrato e vegetação; Modelo 04: impermeabilizante, drenagem, módulos, substrato, vegetação e sistema de irrigação.

Devido à grande variedade de produtos utilizados para compor cada uma das camadas descritas, foram definidos os principais materiais mais utilizados em cada uma delas, selecionando ao menos 4 marcas para cada um dos produtos e consultando o preço de cada um deles em pelo menos 5 lojas especializadas diferentes.

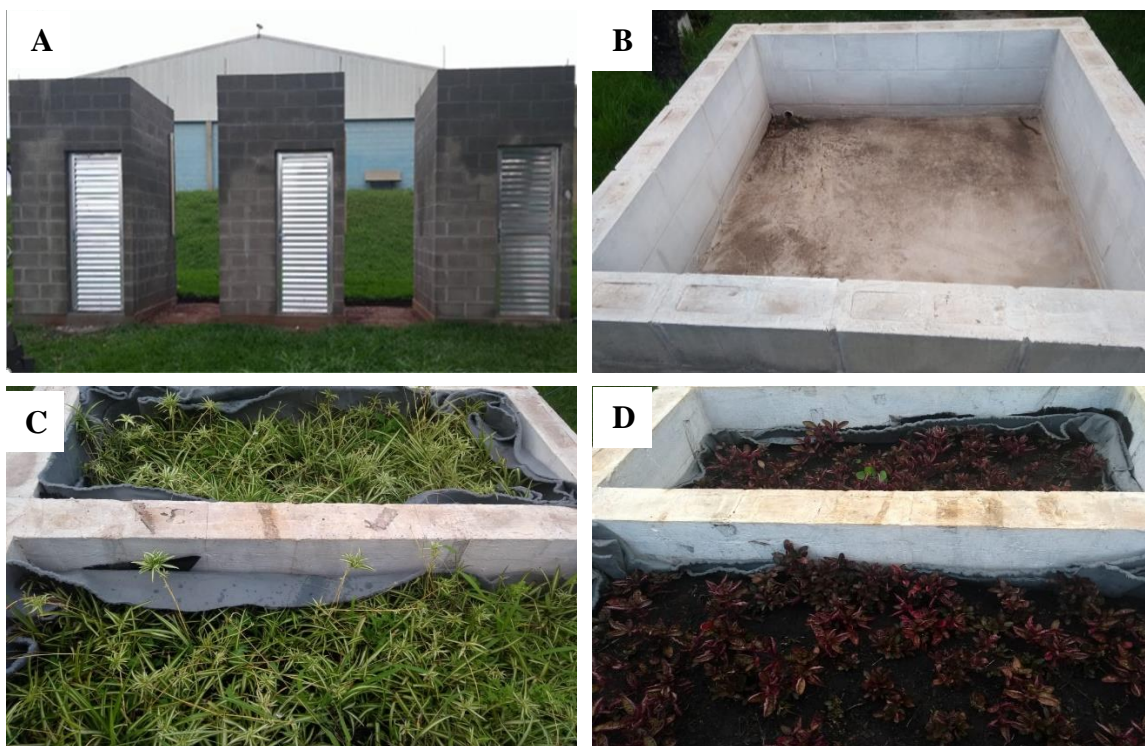
Como opções para a realização da camada de impermeabilização foram consideradas e orçados os seguintes produtos: manta PEAD (polietileno de alta densidade), manta asfáltica convencional, primer asfáltico, manta asfáltica aluminizada, manta asfáltica anti-raiz e impermeabilizantes líquidos. Para a camada de drenagem foram orçados manta

drenante, argila expandida (cálculo considerando uma camada de 10cm de espessura), tubos de drenagem e flanges para vedação. Como opções do sistema de irrigação, foram levantados os custos de temporizadores manuais e eletrônicos, aspersores e mangueiras. Foram orçadas ainda sete diferentes espécies vegetais e os módulos plásticos de suporte e membrana alveolar, que estão presentes nos modelos mais complexos de telhados.

Módulos Experimentais (M)

Para avaliar o desempenho térmico, três módulos experimentais de alvenaria estrutural de blocos de concreto e laje de concreto foram construídos. Um deles foi designado como módulo de Controle (M1), recebendo apenas impermeabilização superficial da laje. Os demais módulos, contam com camada de impermeabilização, manta anti-raiz, drenagem (manta geotêxtil Geoflex 130 g.m⁻² e camada de 10 cm de argila expandida), 10 cm de substrato e as espécies escolhidas, *Chlorophytum comosum*, também conhecida como Clorofito do Sol (M2), e *Hemigraphis alternata* (M3), conforme a Figura 1. Os módulos medem 1,74 x 1,74 m e têm 3,00 m de altura.

Figura 1. Detalhes Construtivos dos Módulos Experimentais. (A) Vista Frontal dos três Módulos. (B) Módulo Controle. (C) Módulo com *Chlorophytum comosum*. (D) Módulo com *Hemigraphis alternata*.



Fonte: Autores (2018)

Foram utilizados termohigrômetros da marca Testo modelo 174 h data logger, com capacidade para medições de temperatura, na faixa de -20 °C a +70 °C e resolução de 0,1 °C e precisão de 0,5 °C, e umidade, na faixa de 0 a 100% RH e resolução 0,1% RH e precisão de 3%. Com a utilização de quatro equipamentos, as medições foram realizadas simultaneamente no ambiente externo e no interior de cada um

dos módulos a cada 10 minutos (medidas de temperatura e umidade do ar ambiente interno e externo), gerando 144 medidas por dia em cada um dos equipamentos. Ressalta-se que as medidas de temperatura e umidade foram iniciadas na segunda quinzena de fevereiro sendo registradas até dia 10 de abril de 2018 e foram excluídos os dias em que os módulos sofreram algum tipo de manutenção, sendo analisados no total

40 dias válidos, sendo 21 dias de medições no verão e 19 dias no outono.

Os equipamentos forneceram dados brutos em formato de planilha de Excel, da qual foram extraídos os valores máximos, mínimos e médios. Foi realizada ainda a comparação das temperaturas entre os módulos a cada seis horas, dividindo os dias em quatro períodos: madrugada (00:00 às 6:00h), manhã (6:00 às 12:00h), tarde (12:00 às 18:00h) e noite (18:00 às 24:00h). A partir da divisão de períodos, foi aplicado o teste t de student pareado e bicaudal, a nível de significância de 5%, com a finalidade de comparar as temperaturas registradas nos

períodos entre os módulos e confirmar a existência de diferenças significativas do ponto de vista estatístico.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Levantamento de Custos

No levantamento de custos, verificou-se os valores de cada uma das camadas (identificadas de (a) a (g)) que compõe os diversos modelos de telhados verdes. A Tabela 1 apresenta esses valores por camadas e por modelos, com os custos mínimo, médio e máximo encontrados na pesquisa.

Tabela 01. Custos gerais dos telhados verdes no estado de São Paulo

	Custo Mínimo (R\$)	Custo Médio (R\$)	Custo Máximo (R\$)	
Custos por Camadas (R\$. m ⁻²)	(a) Impermeabilização	7,75	29,26	75,00
	(b) Drenagem	96,40	196,08	279,95
	(c) Substrato	9,00	35,24	87,50
	(d) Vegetação	4,50	24,06	48,00
	(e) Módulos Plásticos	74,40	101,60	125,60
	(f) Membrana Alveolar	55,08	55,08	55,08
	(g) Irrigação	0,74	77,92	366,12
Custos por Modelo (R\$. m ⁻²)	Modelo 1 – (a) a (d)	117,65	284,64	490,45
	Modelo 2 – (a) a (e)	192,05	386,24	616,05
	Modelo 3 – (a) a (f)	247,13	441,32	671,13
	Modelo 4 – (a) a (e) e (g)	192,79	464,16	982,17
	Empresas	190,00	249,20	310,00

Nota-se que os valores mais altos estão relacionados às camadas de irrigação, drenagem e módulos plásticos. Ressalta-se que a camada de drenagem é obrigatória em todos os modelos de telhados verdes, sendo dessa forma, a principal responsável pela elevação dos custos construtivos desse tipo de cobertura, principalmente dos modelos mais simples. Por outro lado, a camada de irrigação, que apresenta o maior custo dentre todos os componentes, e os módulos plásticos são utilizados apenas em modelos de telhados mais complexos, não sendo componentes obrigatórios nos telhados vegetados.

As empresas analisadas em sua maioria utilizam os modelos mais básico (Modelo 1) e com materiais de baixo custo, como nota-se comparando-se os resultados de custos de empresas e do Modelo 1. Por este motivo, apresentam os menores valores médios e máximos quando comparados com os demais.

O telhado verde que segue modelo construtivo 1 apresenta o menor valor de custo mínimo, uma vez que ele é composto por apenas 4 camadas, tornando-o, assim, o mais acessível. O custo de implantação sofre um aumento gradativo de acordo com a complexidade dos modelos (maior número de camadas e materiais), exceto para o custo mínimo do modelo 4, devido ao baixo custo da camada de irrigação, composta por materiais mais simples e de menor valor.

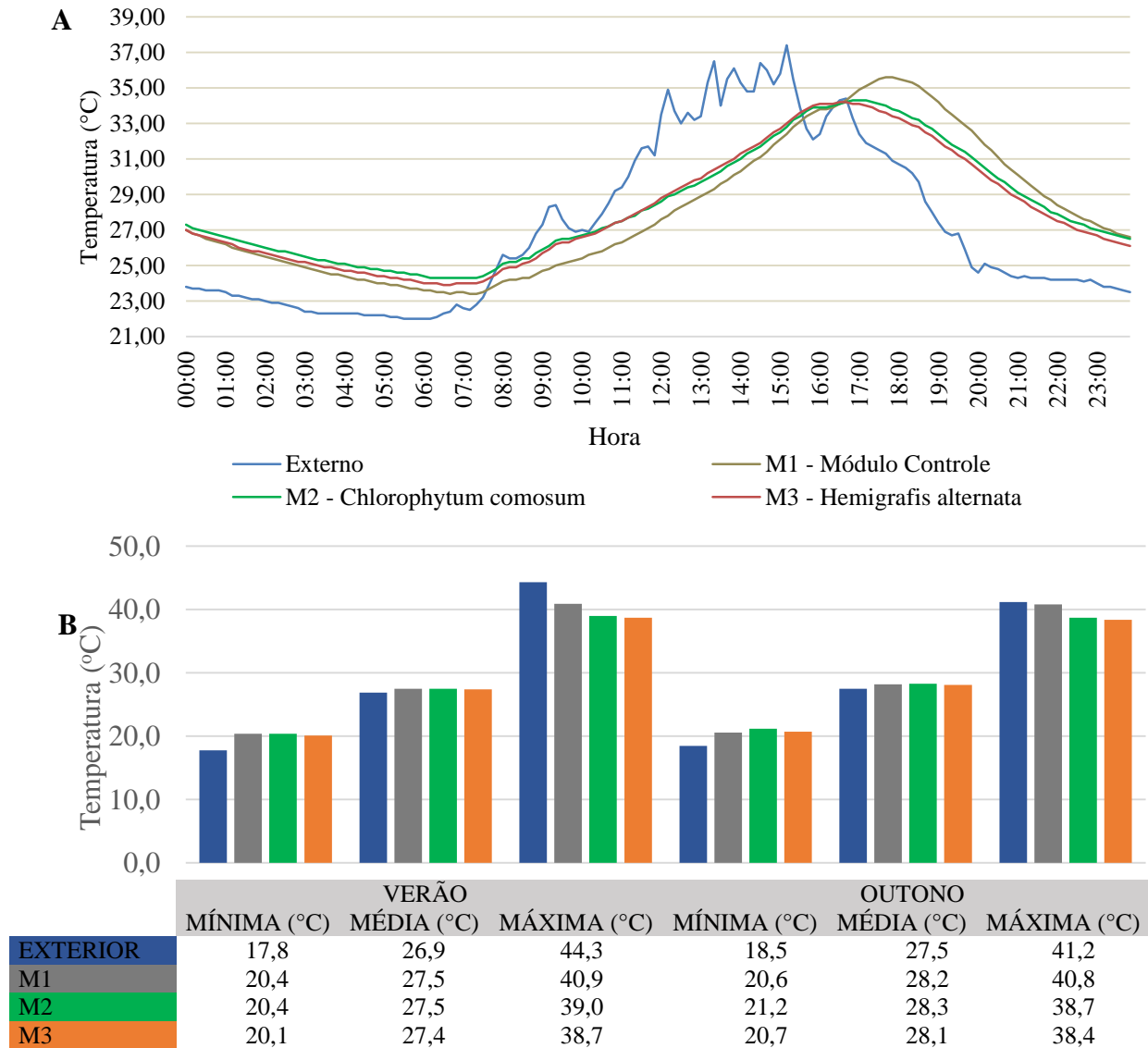
Conforto Térmico

As medições com os termohigrômetros durante 40 dias indicaram que as temperaturas máximas tanto no verão (21 dias avaliados) quanto no outono (19 dias avaliados) ocorrem no período das 14:00 às 15:00 no ambiente externo aos módulos, sendo que esse comportamento foi observado em 45% dos dias

avaliados. As temperaturas máximas observadas dentro dos módulos ocorreram majoritariamente no intervalo entre as 17:00 e 18:00, ocorrendo em 57,50% dos dias no M1, em 50% dos dias no M2 e 42,50% dos dias em M3. Dessa forma, afirma-se que ocorre um atraso térmico médio de 4 horas. Porém ressalta-se que os materiais empregados nos módulos possuem alta massa térmica, sendo compostos de blocos de concreto, um material que apresenta capacidade de absorver, armazenar e liberar calor lentamente. As mínimas temperaturas registradas, ocorrem entre as 6:00 e as 7:00 nos registros externos (80% dos dias) e entre as 7:00 e as 8:00 nos módulos, com uma ocorrência em 82,50% dos dias em M1, 67,50% dos dias em M2 e 70% dos dias em M3, este comportamento pode ser observado na figura 2A. O período de ocorrência das temperaturas máximas e mínimas se assemelha aos obtidos por Feitosa e Wilkinson (2018) no Rio de Janeiro.

Kumar e Mahalle (2016) observaram atrasos térmicos entre 2 e 3 horas, resultados inferiores aos obtidos neste trabalho. Essa diferença pode estar relacionada aos materiais empregados na construção das paredes, uma vez que a cobertura representa apenas parte da superfície exposta do edifício. Outros fatores que podem justificar essa diferença são os locais em que as pesquisas foram realizadas, com diferentes incidências solares e temperaturas aos que os telhados foram expostos, além da vegetação utilizada e a profundidade de substrato (EKSI et al., 2017).

Figura 2. Comparação entre as temperaturas exterior e interior em cada um dos módulos (de controle – M1, e com telhado verde – M2 e M3) registradas em um dia típico (A); e os dados mínimos, médios e máximos do verão e outono (B).



Apesar das temperaturas médias obtidas nos módulos serem praticamente iguais nos períodos estudados, observa-se que as temperaturas máximas registradas nos módulos com telhado verde (M2 e M3) são inferiores às registradas no módulo laje impermeabilizada exposta (M1) tanto no verão, quanto no outono (Figura 2B). Santos (2012), observou o mesmo comportamento em sua pesquisa, a qual a temperatura máxima registrada no módulo com telhado verde é inferior ao módulo de controle, e o oposto foi verificado para as temperaturas mínimas registradas. Outro trabalho que mostra este mesmo comportamento é de Gagliano et al. (2015) que realizou um estudo na Itália comparando as temperaturas das superfícies internas de um telhado padrão (laje de concreto com uma camada de isolamento térmico), com um telhado verde, e alcançou como temperaturas máximas 31°C e 26°C respectivamente. Kumar e Mahalle (2016) atingiram

temperaturas máximas internas para o telhado convencional (laje de concreto exposta) e para a cobertura ecológica de 31,5°C e 27,1°C, respectivamente. Os valores de temperaturas máximas podem ser divergentes devido à localização de cada pesquisa e das características construtivas de cada telhado e vedação utilizados.

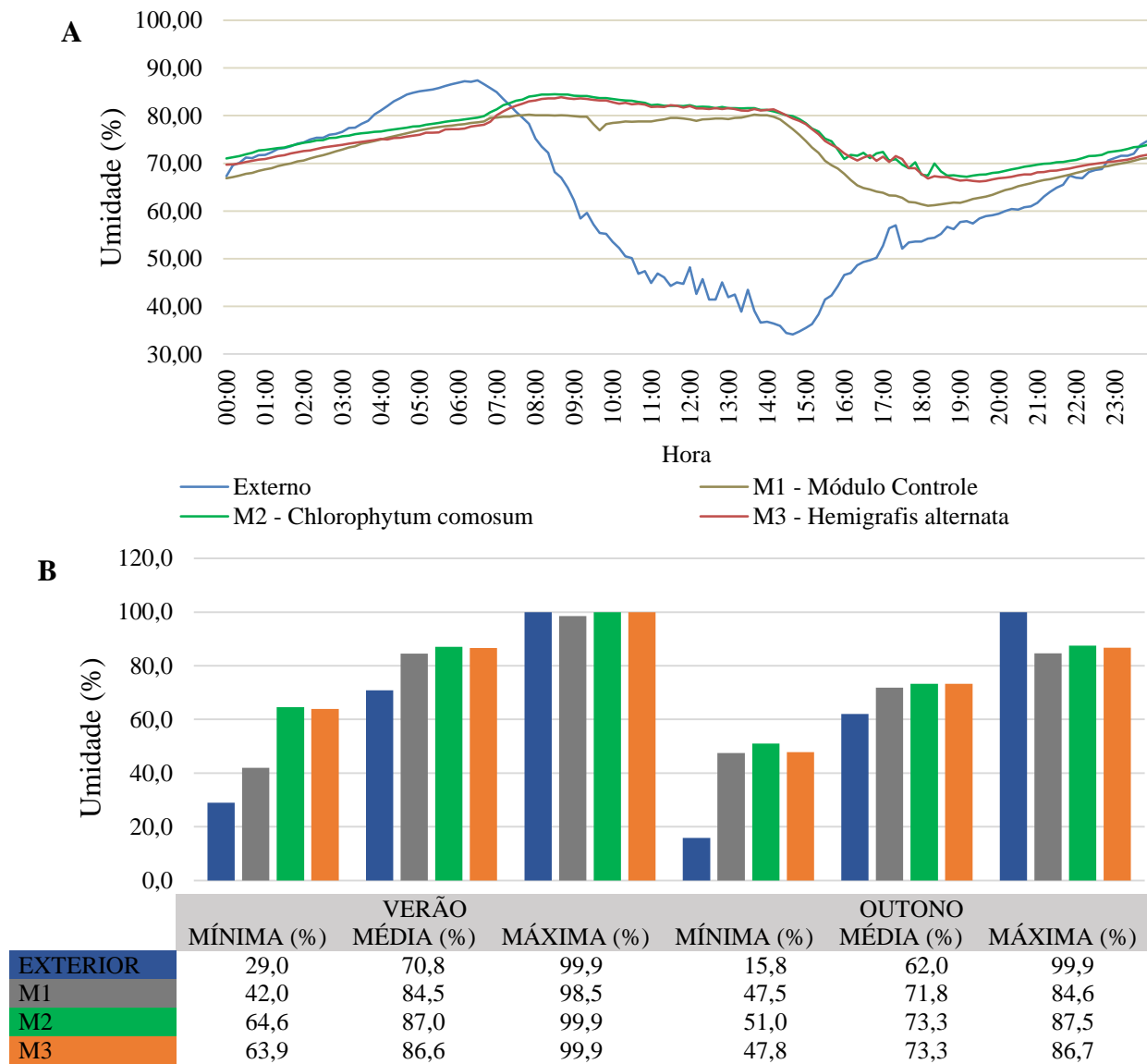
As diferenças significativas entre as temperaturas registradas foram comprovadas a partir do teste t de student, realizado entre as temperaturas registradas nos módulos durante todos os dias avaliados. Foi possível comprovar dessa forma que, durante o período de verão, as temperaturas registradas no módulo M2 foram estatisticamente diferentes das registradas no M1 em 90,5% das madrugadas, em 100% das manhãs, 67% das tardes e 85,7% das noites. O mesmo ocorreu na comparação entre as temperaturas registradas nos módulos M3 e M1, confirmando as diferenças estatísticas significativas para 85,7%

das madrugadas, 95,2% das manhãs, 76,2% das tardes e 95,2% das noites. Já no período do outono, a comparação entre as temperaturas registradas em M1 e M2 apresentaram diferenças significativas em 89,5% das madrugadas e das tardes, enquanto as manhãs e noites foram estatisticamente diferentes em 100% dos dias avaliados. Na mesma estação, a comparação entre as temperaturas registradas em M1 e M3 se mostraram estatisticamente diferentes em 94,7% das madrugadas avaliadas, 73,7% das tardes e 100% das manhãs e noites avaliadas. Vale ressaltar que o teste t confirma que existem diferenças estatísticas significativas entre os módulos de telhado verde e o módulo de controle, sendo possível desta forma confirmar as

diferenças de temperatura e consequentemente de conforto térmico entre eles.

Em relação às medições de umidade, observou-se um comportamento inversamente proporcional à temperatura, em que as maiores taxas de umidades foram registradas no período de temperaturas mínimas, e as umidades mínimas durante o período onde as temperaturas eram máximas, isto para todos os registros com exceção do Módulo 1 no período de verão, onde a umidade mínima ocorre entre 18-19h em 57,14% dos dias avaliados. Feitosa e Wilkinson (2018) corroboram a relação inversa entre temperatura e umidade apresentada neste trabalho. Os comportamentos descritos podem ser observados nas Figuras 3A e B.

Figura 3. Comparação entre a umidade exterior e interior em cada um dos módulos (de controle – M1, e com telhado verde - M2 e M3) registradas em um dia típico (A); e os dados mínimos, médios e máximos do verão e outono (B).



As umidades mínimas, médias e máximas registradas em M2 e M3, são superiores às registradas no módulo M1. Os telhados verdes demonstram menor amplitude de temperatura e

umidade em comparação com a cobertura de laje impermeabilizada, dessa forma, sendo menos suscetíveis às

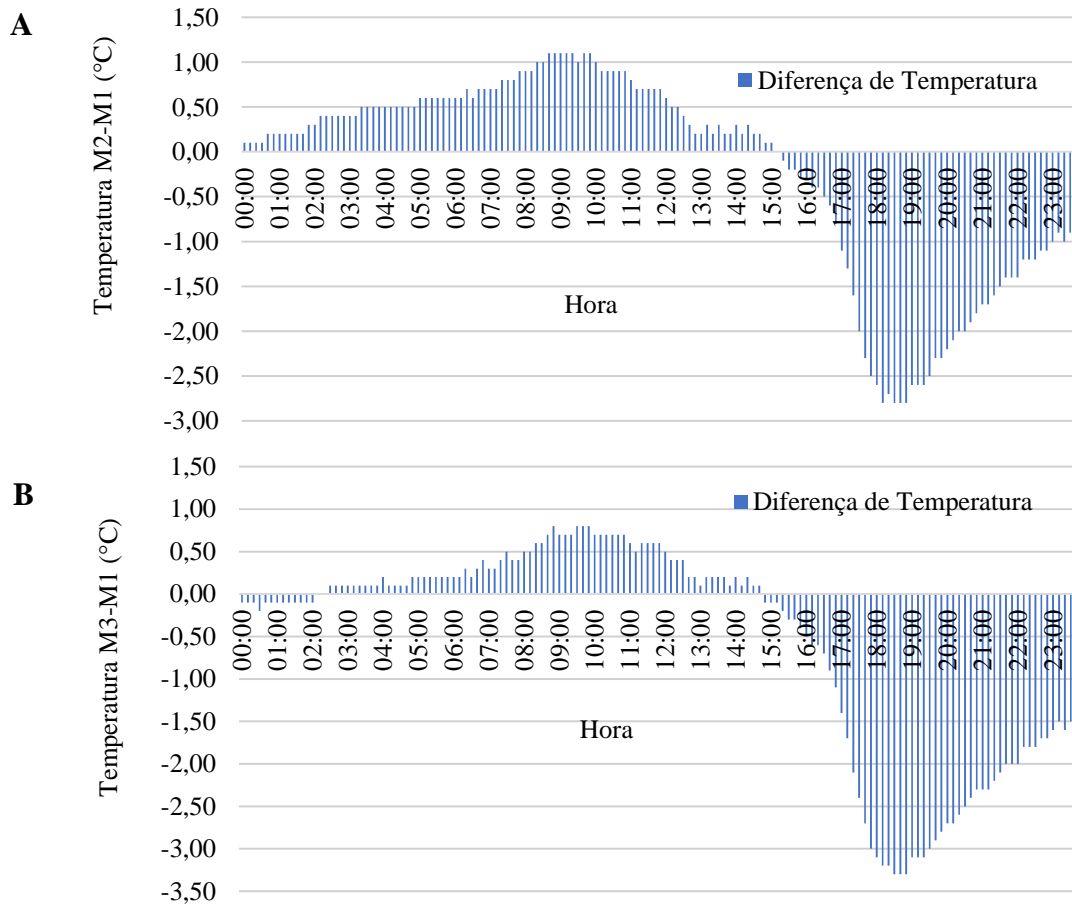
alterações externas, comprovando sua eficiência como isolante para a edificação.

Em relação às duas espécies vegetais utilizadas, a Figura 2A apresenta o comportamento observado nas medições de temperatura e umidade, em que não foram registradas diferenças significativas entre os módulos de telhado verde. Esta análise baseou-se em gráficos gerados a partir dos dados coletados dos equipamentos, separados em medição diária, observando-se uma diferença média inferior a $0,5^{\circ}\text{C}$ em relação a temperatura, e 3% quanto a umidade, considerando-se a precisão de $0,5^{\circ}\text{C}$ e 3% RH dos equipamentos utilizados.

Comparando-se as temperaturas entre cada módulo com telhado verde e o de controle (M2xM1 e M3xM1) observa-se que no período da manhã M2 e M3 apresentavam temperaturas superiores ao módulo de controle, atingindo o pico entre 8-9h,

com diferenças de $+1^{\circ}\text{C}$ para M2 e $+0,75^{\circ}\text{C}$ para M3. Esse desempenho pode ser atribuído à capacidade de isolamento térmico dos telhados verdes, levando-os a pouca perda de calor ao longo da madrugada, que é, em geral, o período mais frio do dia. A partir deste pico, esse comportamento inverte, com perda progressiva de temperatura dos módulos com telhados vegetados em comparação com o módulo de controle, atingindo picos de $-2,8^{\circ}\text{C}$ a $-3,3^{\circ}\text{C}$, para M2 e M3 respectivamente, por volta das 18h. Esse comportamento pode ser observado na Figura 4A e B, a qual refere-se a um dia de análise, e o mesmo foi notado no verão em 61,90% dos dias em M2-M1, e 71,42% para M3-M1, e, para o outono essas taxas são de 30,43% e 65,22%, respectivamente. Contudo, é visível que neste fator, a *Hemigraphis alternata* (M3) indicou um melhor desempenho térmico que a *Chlorophytum comosum* (M2).

Figura 4. Diferenças de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de um dia típico de verão entre os módulos com telhado verde (M2 E M3) e o módulo de controle (M1). (A) M2 - M1. (B) M3 - M1.



Dessa forma, é perceptível que nos horários de temperatura interna máxima nos módulos, por volta das 18h, M2 e M3 apresentam temperaturas inferiores à M1, sendo que essa diferença no verão atinge a máxima de $2,8^{\circ}\text{C}$ para M2-M1 e $3,3^{\circ}\text{C}$ para M3-M1, e no outono, $3,0^{\circ}\text{C}$ e $3,4^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

Portanto, observando um resfriamento máximo de $3,4^{\circ}\text{C}$ quando comparado o telhado verde com outros tipos de

cobertura, como por exemplo o trabalho de Tam et al (2016) que realizaram um estudo em Hong Kong e obtiveram resultados inferiores. Eles variaram as espessuras da camada de solo do telhado verde e concluíram que uma cobertura sustentável extensiva, com até 20cm de espessura de solo, atingiu uma diferença máxima de $2,1^{\circ}\text{C}$. Para coberturas verdes intensivas (considerando 30cm de solo), observaram um resfriamento de até $3,4^{\circ}\text{C}$. Gagliano et al. (2015), em seu estudo

na Itália, observou uma diferença de até 3,5°C na temperatura interna com uma cobertura verde, também quando comparada com uma cobertura convencional (laje de concreto sem isolante térmico).

O estudo realizado por Kumar e Mahalle (2016) em Nagpur, na Índia, utilizou uma espessura de substrato de 10 cm e obteve-se um resultado de amplitude térmica máxima de 4,4°C, apresentando valores superiores aos deste trabalho, uma vez que ambos adotaram a mesma espessura de substrato. Já o trabalho que obteve maior amplitude térmica entre os analisados, é o de Moraes (2004), realizado no município de São Carlos (SP) no Brasil, que utiliza uma espessura de 12 cm e apresenta valor máximo de 5,1°C.

Outro trabalho semelhante foi realizado por Moghbel e Salim (2017) em Teerã, no Irã, e obteve uma diferença máxima de temperatura de 3,7°C, no entanto a espessura do substrato não é informada.

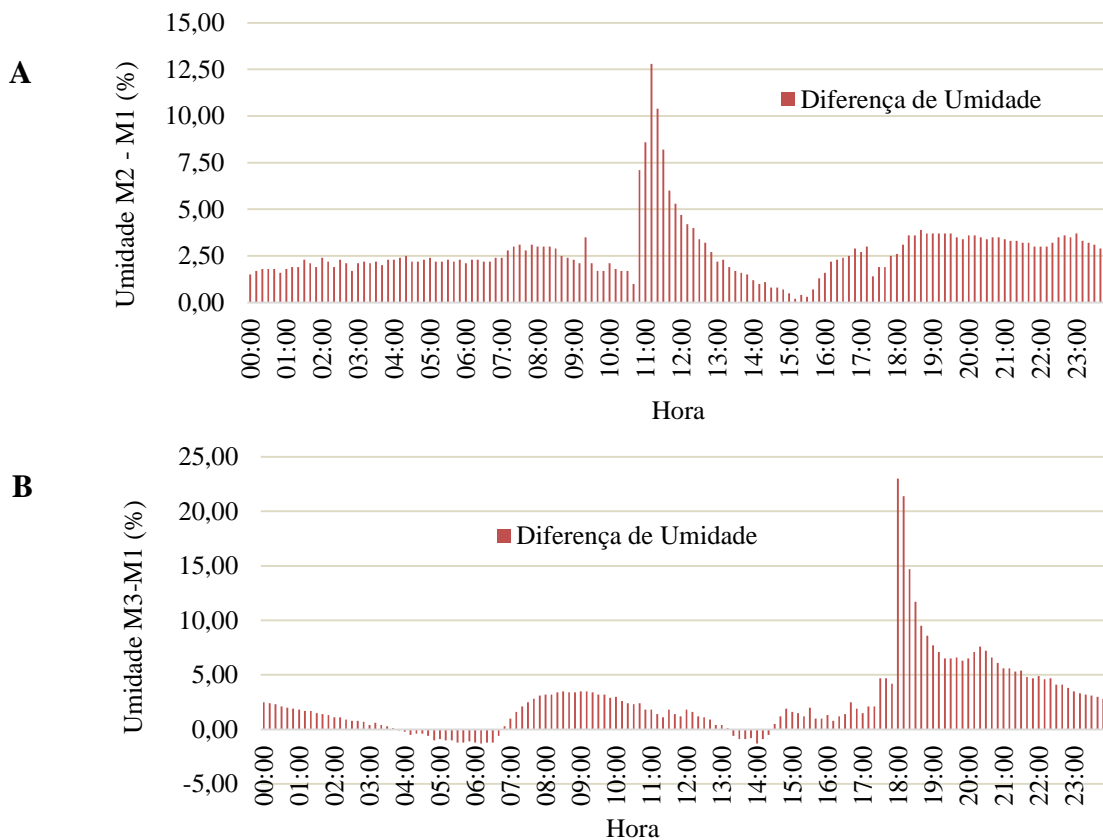
Os valores apresentados são semelhantes aos obtidos neste trabalho. Algumas diferenças entre os valores obtidos podem estar relacionadas a diversos fatores, como localização, clima, estação do ano, espessura da camada de substrato, materiais que compõem o telhado verde, espécie de planta, entre outros fatores (EKSI et al., 2017).

O desempenho térmico dos telhados verdes apresentou-se superior ao convencional. Apesar de na maioria dos dias as espécies de vegetais selecionadas apresentarem temperaturas próximas, a espécie *Hemigraphis alternata* (M3) indicou um melhor desempenho térmico que a *Chlorophytum comosum* (M2), quando comparada a quantidade de dias em que o comportamento das diferenças entre M2-M1 e M3-M1 foi favorável (descrito anteriormente e apresentado na Figura 4). Além disso, o M3 apresentou maiores diferenças de temperaturas comparadas com o telhado convencional que o módulo M2.

Em relação à umidade, após a aplicação do mesmo método de análise usado na comparação de temperatura entre os módulos, observou-se que constantemente as taxas de umidade dos módulos de telhado verde são maiores do que as registradas na cobertura convencional, comportamento também obtido pelo estudo desenvolvido no Rio de Janeiro por Feitosa e Wilkinson (2018).

A diferença de umidade atingiu até 23,4 % para M2-M1 e 23% para M3-M1 no verão, e no outono, 16,2% e 13%, respectivamente, conforme demonstrado na Figura 5 A e B.

Figura 5. Diferenças de umidade (%) típicas entre os módulos com telhado verde e o módulo de controle. (A) M2 - M1. (B) M3 - M1.



CONCLUSÕES

Os telhados verdes têm maior custo de implementação (R\$321,64m²), porém os ganhos de isolamento e conforto térmico são comprovados, mantendo a edificação até 3,4°C

mais fria em dias de verão em comparação com um telhado convencional, além de manter a umidade do ambiente até 23,4% maior.

Os telhados verdes conseguem atenuar os picos de temperatura e aumentar a umidade nas edificações durante os períodos mais quentes do ano, mantendo o ambiente mais confortável para os usuários, podendo inclusive diminuir o uso de equipamentos de refrigeração de ambientes, gerando economia de energia.

A espécie vegetal *Hemigrafis alternata* utilizada no telhado verde tem melhor isolamento térmico na construção, em comparação com o telhado convencional e com o telhado verde com *Chlorophytum comosum*.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa na modalidade de bolsa de Iniciação Científica. Agradecemos ainda ao Dr. Danilo Covaes Nogarotto pelo auxílio com os testes estatísticos realizados no desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

- ABHIJITH, K. V.; KUMAR, P.; GALLAGHER, J.; MCNABOLA, A.; BALDAUF, R.; PILLA, F.; BRODERICK, B.; SABATINO, S. D.; PULVIRENTI, B. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review. *Atmospheric Environment*, v. 162, p. 71-86, 2017. 10.1016/j.atmosenv.2017.05.014.
- AFLAKI, A.; MIRNEZHAD, M.; GHAFARIANHOSEINI, A.; GHAFARIANHOSEINI, A.; OMRANY, H.; WANG, Z.; AKBARI, H. Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong. *Cities*, v. 62, p. 131-145, 2017. 10.1016/j.cities.2016.09.003.
- BEATRICE, C. C. Avaliação do Potencial de Uso de Três Espécies Vegetais Como Cobertura Leve de Telhado em Edificações. São Carlos, 2011. 125f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2011.
- BESIR, A. B.; CUCE, E. Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 915-939, 2018. 10.1016/j.rser.2017.09.106
- CARPENTER, C. M. G.; TODOROV, D.; DRISCOLL, C. T.; MONTESDEOCA, M. Water Quantity And Quality Response Of A Green Roof To Storm Events: Experimental And Monitoring Observations. *Environmental Pollution*. v. 218, p. 664-672, 2016. 10.1016/j.envpol.2016.07.056.
- CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. Limeira: Temperatura, Tempo e dados climatológicos. Disponível em: https://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_306.html. Acesso em 18/10/2018.
- CIIAGRO. Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas. Resenha Agrometeorológica – quadro chuva mensal por período. Disponível em: <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Quadros/QChuvaPeriodo.asp>>. Acesso em 19/10/2018.
- EKSI, M.; ROWE, D. B.; WICHMAN, I. S.; ANDRESEN, J. A. Effect of substrate depth, vegetation type, and season on green roof thermal properties. *Energy and Buildings*. v. 145, p. 174-187, 2017. 10.1016/j.enbuild.2017.04.017
- FEITOSA, R. C.; WILKINSON, S. J. Attenuating heat stress through green roof and green wall retrofit. *Building and Environment*, v. 140, p. 11-22, 2018. 10.1016/j.buildenv.2018.05.034
- GAGLIANO, A.; DETOMMASO, M.; NOCERA, F.; EVOLA, GIANPIERO. A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs. *Building and Environment*, v. 90, p. 71-81, 2015. 10.1016/j.buildenv.2015.02.043.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Canal Cidades: Cidade de Limeira/SP. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/limeira/panorama>>. Acesso em: 08/12/2018.
- KIM, J.; HONG, T.; JEONG, J.; KOO, C.; JEONG, K. An optimization model for selecting the optimal green systems by considering the thermal comfort and energy consumption. *Applied Energy* 169, p. 682-695, 2016. 10.1016/j.apenergy.2016.02.032.
- KUMAR, V. V.; MAHALLE, A. M. Investigation of the thermal performance of green roof on a mild warm climate. *International Journal of Renewable Energy Research*, v. 6, n. 2, p. 487-493, 2016.
- MOGHBEL, M.; SALIM, R. E. Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO₂ content. *Urban Climate*, v. 20, p. 46-58, 2017. 10.1016/j.uclim.2017.02.012
- MORAIS, C. S. D. Desempenho Térmico de Coberturas Vegetais Em Edificações na Cidade de São Carlos – SP. São Carlos, 2004. 108f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos. 2004.
- PALLA, A.; GNECCO, I. Chapter 3.11 - Green Roofs to Improve Water Management. *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*, p. 203-213, 2018.
- PAULA, R. Z. R. A Influência da Vegetação no Conforto Térmico do Ambiente Construído. Campinas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. 2004. 119f.

RAN, J. TANG, M. Effect of Green Roofs Combined with Ventilation on Indoor Cooling and Energy Consumption. *Energy Procedia*, v. 141, p. 260–266, 2017. 10.1016/j.egypro.2017.11.103.

RENTERGHEM, T. V. Chapter 3.8 – Green Roofs for Acoustic Insulation and Noise Reduction. *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*, p. 167–179, 2018.

SANTOS, D. J. P. Desempenho Térmico de uma Cobertura verde Num Edifício Solar Passivo. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente), Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2012.

SPOSITO, M. E. B. Capitalismo e Urbanização. Contexto. São Paulo: 10, 2000.

SQUIER, M.; DAVIDSON, C. I.; Heat Flux And Seasonal Thermal Performace Of Na Extensive Green Roof. *Building and Environment*. V. 107, p. 235-244, 2016. 10.1016/j.buildenv.2016.07.025.

TAM, V. W. Y.; WANG, J.; LE, K. N. Thermal Insulation And Cost Effectiveness Of Green-roof Systems: An Empirical Study In Hong Kong. *Building and Environment*. V. 110, p. 46-54, 2016. 10.1016/j.buildenv.2016.09.032

VIJAYARAGHAVAN, K. Green Roofs: A Critical Review On The Role Of Components, Benefits, Limitations And Trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 57, p. 740 – 752, 2016. 10.1016/j.rser.2015.12.119

WEATHERS PARK, Limeira-SP. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/30187/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Limeira-Brasil-durante-o-ano#Sections-Precipitation>>. Acesso em: 08/12/2018.

ZHANG, Z. SZOTA, C. FLETCHER, T. D. WILLIAMS, N. S. G. WERDIN, J. FARRELL, C. Influence of plant composition and water use strategies on green roof storm water retention. *Science of the Total Environment*, v. 625 p. 775–781, 2018. 10.1016/j.scitotenv.2017.12.231.