

Desempenho térmico de sistema de cobertura vegetada na região do semiárido alagoano**Thermal performance of green roof in the semi-arid region of Alagoas**

DOI:10.34117/bjdv6n12-737

Recebimento dos originais: 29/11/2020

Aceitação para publicação: 29/12/2020

Wellington Souza Silva

Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas

Endereço: Avenida Lourival Melo Mota, S/N, Tabuleiro do Martins, Maceió-AL CEP 57072-900

E-mail: wellington-souza94@gmail.com

Ricardo Victor Rodrigues Barbosa

Doutor, docente do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas

Endereço: Avenida Lourival Melo Mota, S/N, Tabuleiro do Martins, Maceió-AL CEP 57072-900

E-mail: rvictor@fau.ufal.br

Juliana Oliveira Batista

Doutora, docente do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas

Endereço: Avenida Lourival Melo Mota, S/N, Tabuleiro do Martins, Maceió-AL CEP 57072-900

E-mail: juliana.batista@fau.ufal.br

RESUMO

A inércia térmica para resfriamento e o resfriamento evaporativo, indicados como estratégias bioclimáticas para a região semiárida, podem ser obtidos utilizando coberturas vegetadas. Entretanto, poucos estudos abordam o desempenho térmico dessas coberturas em climas quentes e secos. Assim, esta pesquisa objetivou analisar o desempenho térmico de um sistema de cobertura vegetada na região semiárida do Estado de Alagoas, a partir de pesquisa experimental em células teste construídas na cidade de Arapiraca. Foram monitoradas quatro variáveis: temperatura superficial interna e externa das coberturas e temperatura do ar interno e externo, em cinco células teste com diferentes coberturas: laje impermeabilizada (LI), laje impermeabilizada com solo nu (SO), com cobertura vegetada (CV), cobertura com telha cerâmica (TC) e com telha de fibrocimento (FI). O monitoramento foi realizado por um período de 24 h, em um dia típico de verão. Os resultados mostraram que o sistema de cobertura vegetada apresentou um bom comportamento térmico frente aos sistemas analisados, principalmente quanto à redução da amplitude térmica diária. Observou-se, também, que o comportamento interno da temperatura do ar no sistema SO, apesar de ter apresentado elevadas temperaturas superficiais externas, teve desempenho interno semelhante ao registrado na cobertura vegetada (CV).

Palavras-chave: Telhado verde, Inércia térmica, Resfriamento evaporativo, Estratégia bioclimática.

ABSTRACT

Thermal inertia for cooling and evaporative cooling are bioclimatic strategies for the semi-arid region and can be achieved with the use of green roofs. However, few studies address the thermal performance

of green roofs in hot and dry climates. Thus, this research aimed to analyze the thermal performance of a green roof system in the semiarid region of the State of Alagoas, based on experimental research on test cells built in the city of Arapiraca. Four variables were monitored: internal and external surface temperature of the roofs and internal and external air temperature, in five test cells with different roofs: waterproofed slab (LI), waterproofed slab with bare soil (SO), with green roof (CV), coverage with ceramic tile (TC) and with fiber cement tile (FI). Monitoring was carried out for 24 h, on a typical summer day. The results showed that the green roof system presented a good thermal performance among the analyzed systems, mainly in the reduction of the daily thermal amplitude. It was also observed that the internal performance of the air temperature in the SO system, despite having high external surface temperatures, had an internal performance similar to that registered in the green roof (CV).

Keywords: Green roofs, Thermal inertia, Evaporative cooling, Bioclimatic strategy.

1 INTRODUÇÃO

Coberturas vegetadas são “sistemas de cobertura constituídos por camadas especiais que proporcionam a sobrevivência e integridade física de uma massa de vegetação sobre a superfície superior da edificação” (PARIZOTTO FILHO, 2010, p. 89). Eles podem ser moldados in loco, com a instalação direta sobre a laje ou podem ser inseridos por meio de módulos pré-fabricados, proporcionando menor tempo de instalação. Além de funcionar como elemento estético para os edifícios, as coberturas vegetadas promovem uma maior vida útil para a estrutura da coberta, ajudam na proteção contra incêndio, retêm águas pluviais, contribuem para a redução da poluição do ar e para a eficiência energética, ajudando a reduzir a temperatura interna das edificações e externas na cidade, podendo também suprir a falta de áreas vegetadas em centros urbanos consolidados, uma vez que os jardins são transferidos para os telhados das edificações, auxiliando na redução das ilhas de calor (LOPES, 2007; SILVA, 2011; KOZMHINSKY, PINHEIRO, EL-DEIR, 2016).

A principal forma de classificação das coberturas vegetadas considera a espessura do substrato (meio de suporte e crescimento da vegetação) como parâmetro. Tem-se então: coberturas vegetadas extensivas – pequena espessura do substrato (5 a 15 cm), pequeno peso estrutural e menor variedade de vegetação, apenas espécies rústicas e rasteiras, requerendo assim baixa manutenção do sistema; coberturas vegetadas intensivas – grande espessura de substrato (acima de 20 cm), maior peso estrutural e diversidade vegetal, abrigando até árvores; e coberturas vegetadas semi-extensivas ou semi-intensivas – nível intermediário de classificação que consiste em um meio termo entre os dois tipos descritos anteriormente (PECK et. al., 1999; LOPES, 2007; FERRAZ, 2012; MINK, 2003; BEATRICE, 2011, KOZMHINSKY, PINHEIRO, EL-DEIR, 2016; RAPOSO, 2013).

Os componentes básicos das coberturas vegetadas são distribuídos em cinco camadas: impermeabilização da estrutura de suporte, para garantir a estanqueidade da construção; camada de

drenagem, destinada a escoar, drenar o excesso e armazenar água para futuras necessidades do sistema; camada de filtragem, para reter as partículas do solo e permitir circulação livre de ar e água na camada inferior (drenagem); substrato; e vegetação, com espécies adequadas ao local e à tipologia da cobertura vegetada (RAPOSO, 2013; KOZMHINSKY, PINHEIRO, EL-DEIR, 2016).

Em contraponto aos benefícios dessas estruturas, o custo inicial das coberturas vegetadas e os fatores climáticos locais devem ser analisados para verificar a viabilidade da instalação desse sistema de cobertura, além de orientar a escolha dos materiais componentes, principalmente da vegetação.

Bastos et. al. (2020) apresentam estudo da viabilidade de aplicação da cobertura vegetada em uma edificação na cidade de Vespasiano, região metropolitana de Belo Horizonte-MG. De acordo com a pesquisa, a instalação de uma cobertura vegetada em uma residência utilizada como estudo de caso proporcionaria uma economia financeira anual de, aproximadamente, 50% com gastos de energia elétrica, atribuída, especialmente, à redução de uso de aparelhos de ar condicionado, uma vez que a instalação da cobertura vegetada permitiria manter o interior da residência com uma temperatura média de 22 °C.

Vecchia (2005) realizou estudo empírico sobre o comportamento do sistema de cobertura verde leve (CVL) frente a outros quatro sistemas de cobertura (telha cerâmica, telha de fibrocimento, telha de aço galvanizado e laje pré-moldada cerâmica) no clima da cidade de São Carlos, São Paulo. Os dados registrados em protótipos mostraram que o CVL conferiu atraso térmico de 4 h e menor amplitude térmica dentre os sistemas analisados. Resultados semelhantes foram encontrados por Lopes (2007), no mesmo contexto climático.

Michels, Güths e Silva (2020) analisaram o desempenho térmico de uma cobertura verde na cidade de Florianópolis, Santa Catarina, utilizando uma bancada experimental. Os resultados mostraram redução nos valores de temperatura superficial na cobertura verde em comparação à uma cobertura com telha de fibrocimento, com uma diferença térmica de 5 °C, para temperaturas externas mais quentes, e de 3 °C, em situações de temperaturas externas mais amenas.

Santos (2016) estudou dois sistemas de cobertura vegetada com variação de espécies vegetais (babosa e cactos cora-de-frade) e o sistema tradicional de cobertura. Os resultados mostraram melhor desempenho da cobertura vegetada em comparação à telha cerâmica frente ao clima semiárido da cidade de Caruaru, Pernambuco, mostrando-se mais eficiente quando a temperatura externa ultrapassa os 34 °C.

Destaca-se que poucos estudos, como de Santos (2016), abordam o desempenho térmico de coberturas vegetadas no clima semiárido, evidenciando a necessidade de mais pesquisas a serem realizadas neste contexto climático.

Arapiraca, área de estudo deste trabalho, encontra-se na delimitação do Semiárido brasileiro com outros 37 municípios do Estado de Alagoas, tomando-se como critérios de classificação a precipitação média igual ou inferior a 800 mm, índice de aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50 e percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano, conforme as Resoluções nº 107, de 27/07/2017 e de nº 115, de 23/11/2017 (SUDENE, 2017; 2020). O clima do município é tropical com estação seca de verão (As), de acordo com a classificação climática proposta por Köppen-Geiger (KOTTERK et al, 2006). Arapiraca apresenta duas estações características: um verão quente e pouco chuvoso (outubro a março), correspondente ao período quente e seco, e um inverno mais ameno e chuvoso (abril a setembro), período quente e úmido. A temperatura média do ar varia entre 22,1 °C e 26,5 °C, com amplitudes térmicas entre 8 °C (meses chuvosos) e 12 °C (meses secos). A umidade relativa média do ar varia entre 70% e 80%, atingindo valores menores que 50% no período seco. As chuvas são oriundas principalmente da orientação Sudeste, com precipitação anual média de 890,0 mm. A ocorrência dessas chuvas ao longo do ano é irregular, com período chuvoso de cinco a seis meses (abril a agosto ou setembro). Os ventos são oriundos principalmente de Leste e Sudeste com velocidade entre 1,6 m/s a 5,5m/s, com variações entre fraco e bonançoso (SILVA, 2019).

O perfil bioclimático de Arapiraca estudado por Silva (2019) aponta a inércia térmica para resfriamento e o resfriamento evaporativo como algumas das estratégias bioclimáticas indicadas pela Carta Bioclimática de Givoni e ambas podem ser obtidas a partir do uso de coberturas vegetadas. “A massa térmica da cobertura de terra amortiza as variações de temperatura diárias tanto no verão quanto no inverno. Como resultado, os requerimentos de isolamento podem ser substancialmente reduzidos se comparados com coberturas convencionais” (PROJETEEE, 2019). Peck et. al. (1999), Mink (2003), Lopes (2007), Gartland (2010) e outros autores concordam que as coberturas vegetadas podem promover a inércia térmica para resfriamento. Desse modo, este sistema se apresenta como uma possibilidade construtiva para coberturas na cidade de Arapiraca, embora existam poucos estudos quantitativos da eficiência desse sistema em regiões semiáridas, de clima quente e seco.

Assim, o objetivo deste artigo consistiu em analisar o desempenho térmico de um sistema de cobertura vegetada no contexto climático da região do semiárido de Alagoas, durante o período quente e seco, tomando a cidade de Arapiraca como ecossistema de estudo.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Considerando os estudos com coberturas vegetadas realizados por Vecchia (2005), Lopes (2007), Lohmann e Barth (2009), Ferraz (2012) e Perussi (2016), utilizando monitoramento de dados em células teste (escala reduzida), protótipos (escala próxima a realidade) ou plataformas de teste, a metodologia desta pesquisa consistiu na coleta de dados em células teste para a verificação do desempenho térmico de coberturas, conforme os procedimentos descritos a seguir.

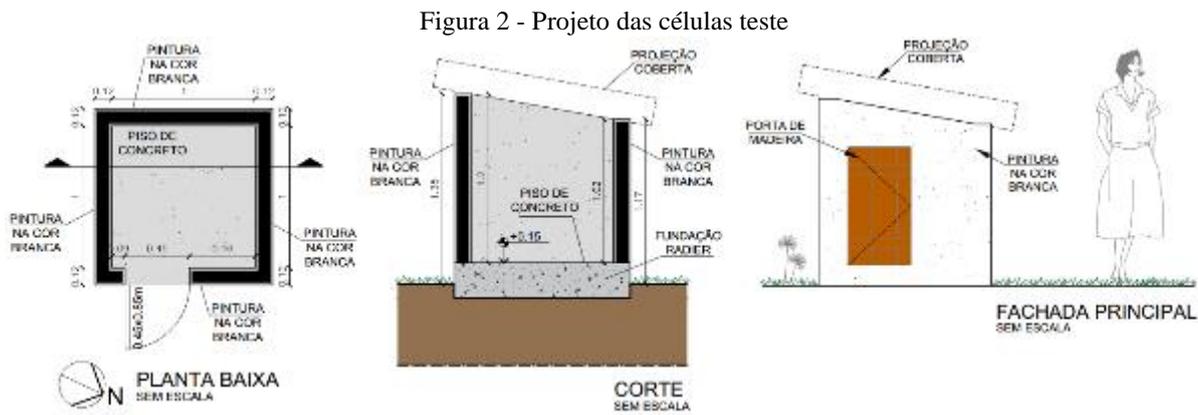
2.1 DESCRIÇÃO DAS CÉLULAS TESTE

As células teste (Figura 1) foram construídas em um canteiro experimental no Campus Arapiraca da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Dentre os oito módulos experimentais, apenas cinco foram utilizados nesta pesquisa – número correspondente aos sistemas de cobertura analisados. As células teste são similares quanto às dimensões, aberturas, elementos construtivos e orientação solar, variando apenas o sistema de cobertura. Cada unidade (Figura 2) permite um volume de ar interno aproximado de 1,0 m³. Quanto ao sistema construtivo, a fundação é tipo radier, piso de concreto, paredes em alvenaria de tijolo cerâmico 6 furos, assentados com argamassa de cimento e areia média, rebocadas (chapisco e emboço) em ambos os lados das paredes (20,0 mm de espessura do reboco) e caiadas (pintadas de cor branca com cal) externamente. As portas são feitas de madeira medindo 45,0 cm por 85,0 cm. As células foram instaladas distantes entre si no mínimo de 3,2 m e no máximo de 4,0 m, dispostas intercaladas de modo que uma não influencie a outra, considerando a trajetória solar (evitando o sombreamento de uma célula sobre a outra) e a predominância dos ventos na região, que se alternam entre Leste (outubro a abril) e Sudeste (maio a setembro) (SILVA, 2019). De maneira geral, os modelos utilizados nessa pesquisa são análogos às estruturas utilizadas por Chagolla-Aranda et al (2017), Osuma-Motta, Herrera-Cáceres e López-Bernal (2017) e Wilkinson e Feitosa (2015), em seus estudos com coberturas vegetadas.

Figura 1 - Células teste no canteiro experimental



Fonte: Imagem original de autoria de Glaydson Colatino Veiga (12/12/2018).



Fonte: Elaborado pelos autores

Foram comparados cinco sistemas de cobertura: laje cerâmica impermeabilizada sem a colocação de telhas (LI), laje cerâmica impermeabilizada com 8,0 cm de solo nu, sem cobertura vegetal (SO), laje cerâmica impermeabilizada com sistema de cobertura vegetada (CV), cobertura com telha cerâmica (TC) e cobertura com telha de fibrocimento (FI), todas com 20% (9°) de inclinação.

Optou-se pela instalação de um sistema simples de cobertura vegetada extensiva por ser de fácil aplicação, comparado à modalidade intensiva ou semi-intensiva, utilizando *Zoysia japonica* (grama esmeralda) como espécie vegetal, plantada sobre uma camada de 6,0 cm de substrato (terra preparada), inserida sobre uma manta de jardim instalada sobre a camada de material drenante (argila expandida). Todos esses componentes foram inseridos na superfície de uma laje pré-moldada cerâmica impermeabilizada com manta líquida. De modo geral, foram utilizadas técnicas e materiais para a cobertura vegetada extensiva especificados na literatura devido à escassez de dados referentes à aplicação dessa técnica construtiva na cidade de Arapiraca. Quanto à manutenção, a cobertura vegetada recebeu irrigação diária realizada no final do dia (a partir das 16:30 h), a fim de evitar grandes perdas de água por evaporação.

2.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

Variáveis internas e externas dos sistemas de cobertura foram monitoradas continuamente durante um período de 24h: temperatura superficial interna ($T_{s.in}$) e externa ($T_{s.ex}$), temperatura do ar no interior do modelo ($T_{a.in}$) e do ambiente externo ($T_{a.ex}$).

Para a aquisição dos dados internos de temperatura do ar ($T_{a.in}$) foram utilizados data loggers HOBO® UX100-003 da ONSET® (Quadro 1), que registraram temperatura do ar (temperatura de bulbo seco) em intervalos de 60 min. Os equipamentos foram dispostos no centro geométrico do espaço interno das células teste, distantes 50 cm de qualquer elemento construtivo, presos em um suporte

composto de uma haste em madeira com base metálica. Os dados externos de temperatura do ar ($T_{a.ex}$) foram obtidos com data logger HOBOTM U23-003003 da ONSETTM (Quadro 1) adaptado para a coleta de variáveis externas com proteção contra a radiação solar direta e precipitação. O equipamento foi instalado a 3,0 m de altura do solo, em um poste pré-moldado de concreto distante 17 m da célula teste mais próxima. O equipamento registrou dados de temperatura do ar externo em um intervalo de 60 min.

Quadro 1 - Hobo® UX100-003 e Hobo® U23-003003

HOBOTM UX100-003 (INTERNO)		HOBOTM U23-003003 (EXTERNO)	
			
<p>Data logger de temperatura do ar e umidade relativa do ar interno</p>		<p>Data logger de temperatura do ar e umidade relativa do ar externo. Ao lado, a proteção contra insolação direta e precipitação</p>	
Sensor de temperatura	Faixa	-20°C a 70°C	
	Precisão	$\pm 0,21^{\circ}\text{C}$ (0°C a 50°C)	
	Resolução	0,024°C a 25°C	
 <p>Equipamento instalado no interior da célula teste</p>		 <p>Equipamento instalado para monitoramento dos dados</p>	

Fonte: Adaptado de ONSET, 2019a; 2019b

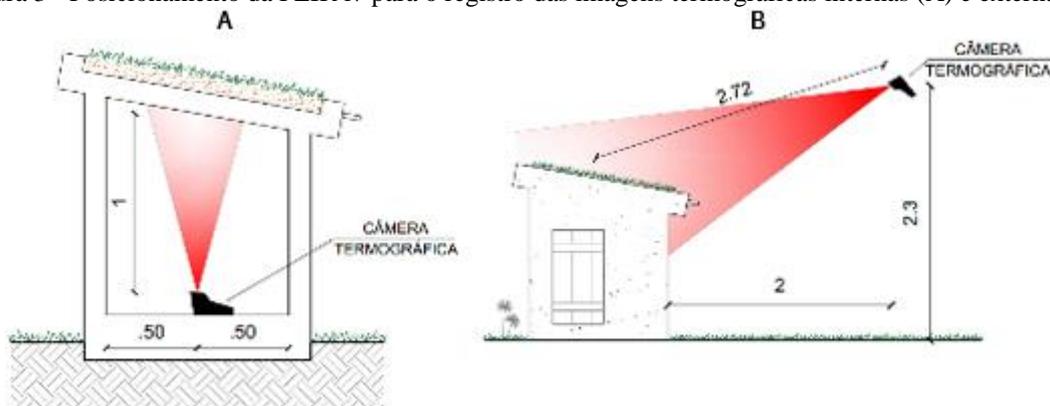
As variáveis medidas nas superfícies das coberturas ($T_{s.in}$ e $T_{s.ex}$) foram obtidas a partir de imagens termográficas internas e externas registradas com câmera termográfica modelo FLIR i7 da FLIR® Systems (Quadro 2), com resolução 120 x 120 pixels e lente FOL 7 mm, auxiliada do software FLIR Tools para tratamento e análise dos valores médios das imagens. Os registros termográficos foram realizados manualmente a cada 3 h em um intervalo de 24 h, com início às 0 h e término às 0 h do dia seguinte. Para a face interna das coberturas, a câmera foi posicionada próxima ao piso da célula, distante aproximadamente 1,0 m da cobertura, ao passo que para a face externa, os registros foram feitos a uma distância média de 2,72 m do ponto central da face externa da cobertura. A Figura 3 ilustra o posicionamento deste equipamento para o registro termográfico.

Quadro 2 - Câmera termográfica FLIR i7

Dados do detector	Resolução de infravermelho	120 x 120 pixels	
Imagens e dados ópticos	Campo de visão	25° x 25°	
	Distância de focagem mínima	0,6 m	
	Frequência das imagens	9 Hz	
Medição	Amplitude de temperaturas do objeto	0°C a +250°C	
	Precisão	± 2°C ou ± 2% de leitura, para uma temperatura ambiente de 10° a 35°C	
Armazenamento de imagens	Formato do ficheiro	JPEG padrão, inclui dados de medição de 14 bits	

Fonte: Adaptado de FLIR, 2010

Figura 3 - Posicionamento da FLIR i7 para o registro das imagens termográficas internas (A) e externas (B)



Fonte: Elaborado pelos autores

2.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DOS SISTEMAS DE COBERTURA

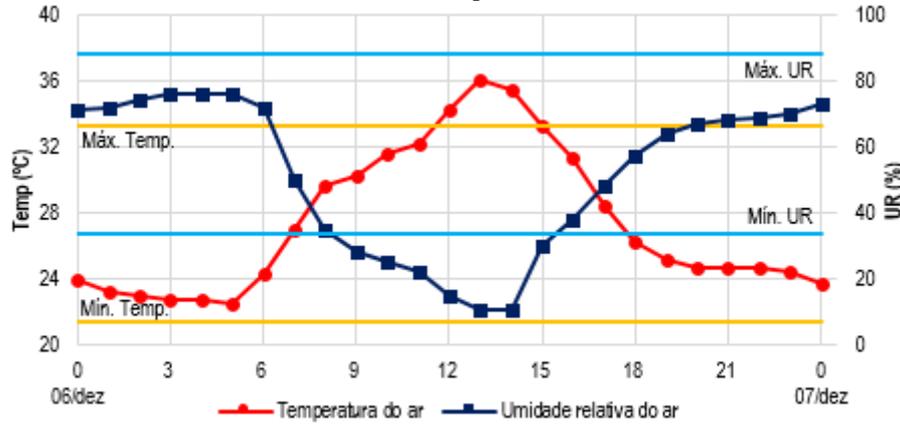
Após o monitoramento das variáveis, os dados foram tratados para permitir a comparação entre os sistemas de cobertura a partir de três parâmetros de análise: a amplitude térmica diária (ΔT), o amortecimento térmico (μ) e o atraso térmico (ϕ).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O monitoramento das variáveis ocorreu no dia 06 de dezembro de 2018, caracterizado como um dia quente, extremamente seco e com elevada amplitude térmica diária – comportamento típico do período quente e seco no contexto climático da região semiárida de Alagoas. A temperatura do ar máxima registrada pela estação meteorológica automática (A353) do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) foi de 36,0 °C, às 13:00 h e a umidade relativa do ar atingiu a mínima de 11%, às 13:00 h e 14:00 h, conforme mostra a Figura 4 e a Tabela 1. Os horários de maior aquecimento alcançaram

temperaturas do ar acima da média de temperatura máxima para o mês de dezembro (33,2 °C) e a umidade relativa do ar chegou a valores bastante inferiores à média da umidade mínima para o mesmo mês (33,7%), de acordo com Silva (2019).

Figura 4 - Gráfico do comportamento da temperatura do ar e umidade relativa do ar no dia 06/12/2018 e média das temperaturas e umidades relativas mínimas e máximas diárias para o mês de dezembro, de acordo com Silva (2019)



Fonte: Adaptado de INMET, 2019

Tabela 1 - Valores máximos e mínimos diários registrados pela estação automática do INMET (A353) no dia 06/12/2018

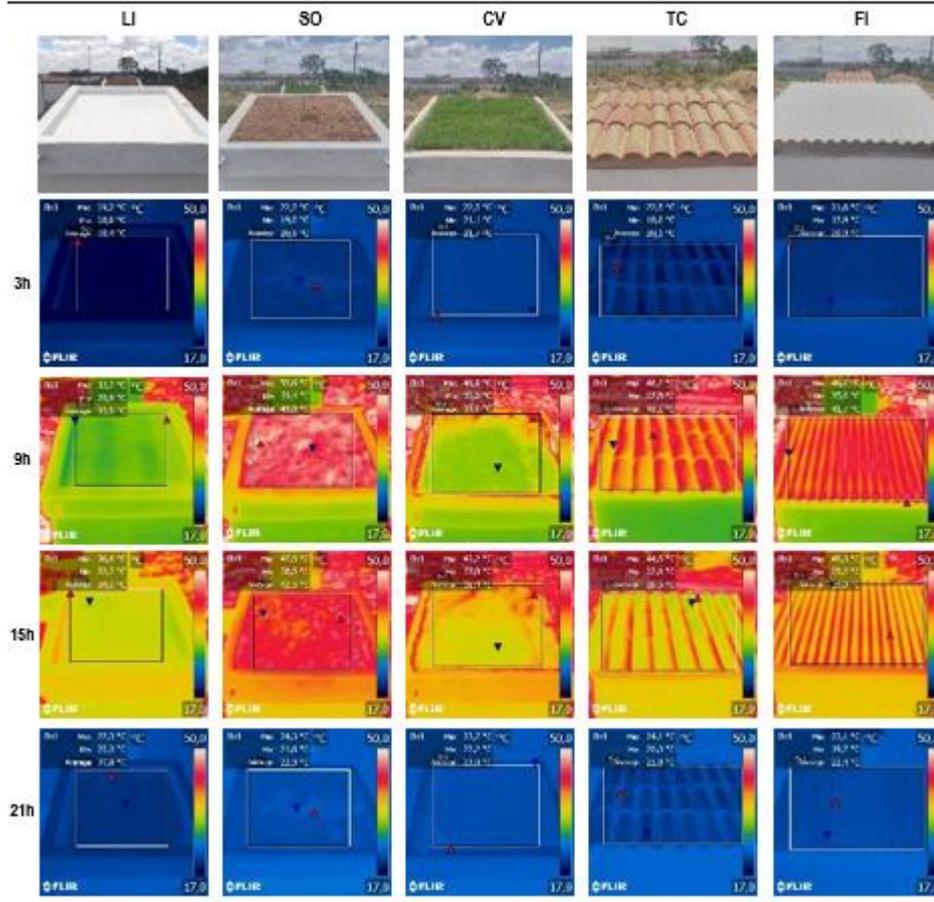
	06/12/2018		Média mensal - DEZ SILVA (2019)	
	Temp (°C)	UR (%)	Temp (°C)	UR (%)
Máxima	36,0	76	33,2	88
Mínima	22,5	11	21,4	33
Amplitude	13,5	-	11,8	-

Fonte: Adaptado de INMET, 2019

As imagens termográficas permitem visualizar a radiação de infravermelhos emitida pelas superfícies, resultante da sua temperatura superficial. O Quadro 3 apresenta algumas das imagens termográficas externas das coberturas. A partir das imagens, é possível distinguir claramente os diferentes comportamentos das coberturas na ausência e na presença de radiação solar. Durante o período noturno, as variações de temperatura superficial média entre as cobertas são pequenas, alcançando 3,3 °C de diferença entre os sistemas LI e CV, às 3:00 h. Durante o dia, as características dos materiais da cobertura têm grande influência na quantidade de radiação absorvida, principalmente o albedo da superfície. A laje impermeabilizada (LI) apresentou as menores temperaturas superficiais externas das 6:00 h às 15:00 h – comportamento bastante influenciado pela cor branca da camada de impermeabilização, proporcionando um albedo de 0,90 (DORNELLES, 2015). Em contrapartida, o sistema laje impermeabilizada com solo nu (SO) apresentou as maiores temperaturas superficiais externas diurnas, com um albedo de 0,20 (ASSIS, SIRQUEIRA E BAMBERG, 2013), chegando a uma

diferença de aproximadamente 15 °C às 9:00 h em comparação com o sistema de laje impermeabilizada (LI). Apesar da célula teste com cobertura vegetada (CV) apresentar um albedo maior que o sistema SO (0,24, de acordo com ASSIS, SIRQUEIRA E BAMBERG, 2013), sua temperatura superficial média durante o dia foi menor que no sistema com solo nu (SO) e mais próxima ao sistema com laje impermeabilizada (LI). Essa diferença de comportamento foi provavelmente influenciada pela quantidade de umidade na cobertura e pelos processos de evapotranspiração e fotossíntese das plantas.

Quadro 3 - Imagens termográficas externas das coberturas às 3:00 h, 9:00 h, 15:00 h e 21:00 h

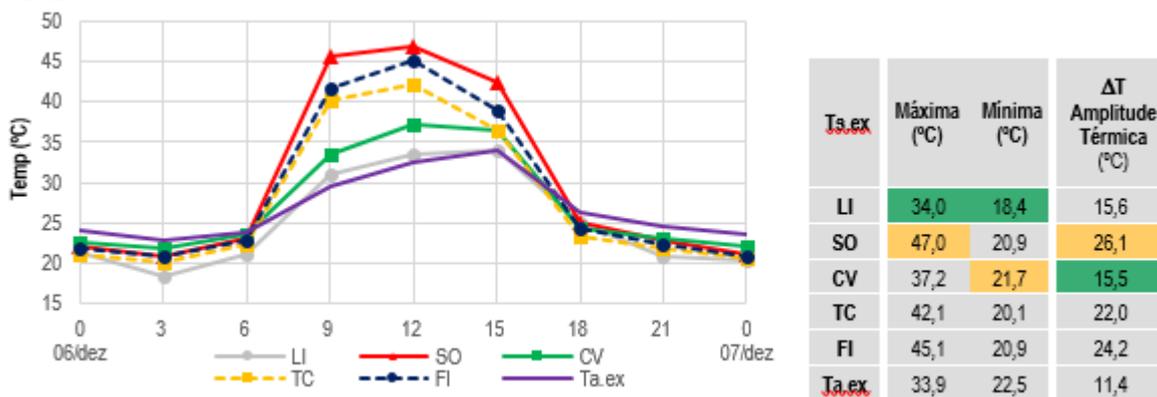


Fonte: Elaborado pelos autores

Os dados médios de temperatura superficial externa das células teste apresentam maiores disparidades entre as 6:00 h e 18:00 h (Figura 5), demonstrando a influência da radiação solar nessa variável, com diferenças que chegam a 14,9 °C entre os sistemas de cobertura. Os sistemas de laje impermeabilizada com solo nu (SO) e cobertura com telha fibrocimento (FI) apresentam as maiores temperaturas superficiais externas diurnas, alcançadas às 12:00 h, com valores de 47 °C e 45,1 °C, respectivamente. As curvas de temperatura de ambos os sistemas são similares, chegando a coincidir valores durante o período noturno, mostrando que os sistemas SO e FI são semelhantes quanto à

absorção e liberação de calor. Os sistemas com laje impermeabilizada (LI) e com cobertura vegetada (CV) apresentaram as menores temperaturas superficiais externas no período diurno, às 9:00 h (30,9 °C e 33,6 °C, respectivamente), influenciados pelo albedo e pelos componentes dos sistemas de cobertura. Durante o período noturno, as coberturas com telha de fibrocimento (FI) e laje impermeabilizada (LI) apresentaram menores temperaturas superficiais, seguida da telha cerâmica (TC). As maiores máximas $T_{s.ex}$ diurnas foram alcançadas às 12:00 h pelos sistemas SO e FI (47,0 °C e 45,1 °C, respectivamente) enquanto que a laje impermeabilizada (LI) apresentou a menor dentre as máximas das células teste às 15:00 h (34°C). Já a cobertura vegetada (CV) teve seu pico às 12:00 h, alcançando 37,2 °C, 4,9 °C, menos aquecido que o sistema com telha cerâmica (TC) no mesmo horário. Quanto às amplitudes térmicas, todos os sistemas tiveram amplitudes maiores que a da temperatura do ar externo ($T_{a.ex}$), mas o sistema CV se destacou com uma diferença de 10,6 °C em relação à amplitude observada em SO, que teve a maior amplitude térmica diária entre todos os sistemas analisados (26,1°C).

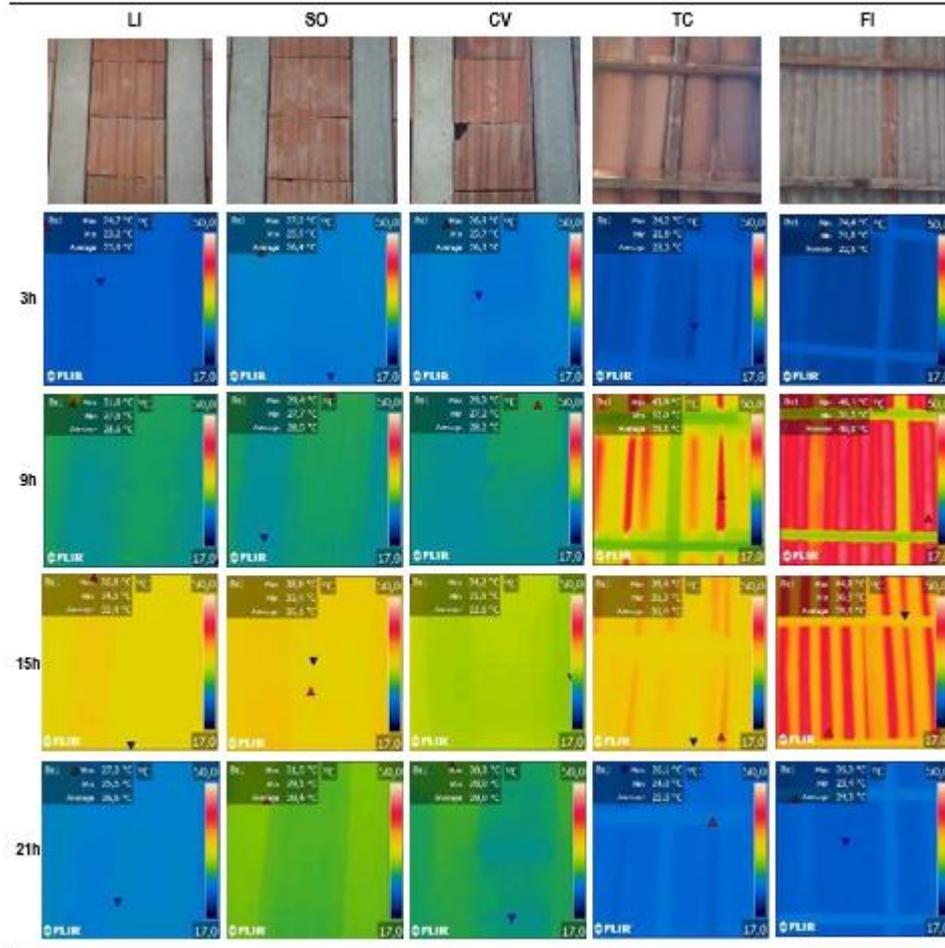
Figura 5 - Gráfico do comportamento da $T_{s.ex}$ nas células teste, valores máximos e mínimos da $T_{s.ex}$ e amplitude térmica das coberturas.



Fonte: Elaborado pelos autores

As imagens termográficas internas (Quadro 4) demonstram grande diferença de comportamento das faces internas da cobertura entre os sistemas com laje impermeabilizada (LI, SO e CV) e com telhas (TC e FI), que ganham e perdem calor mais rapidamente devido sua alta transmitância térmica e menor inércia térmica. Às 9:00 h, os sistemas laje impermeabilizada (LI), solo nu (SO) e cobertura vegetada (CV) apresentaram pouca variação da temperatura superficial interna média ($T_{s.in}$), diferindo entre si apenas em 0,5 °C. Às 15:00 h, o sistema CV apresentou $T_{s.in}$ com valor 3,5 °C menor que o sistema SO e 7,0 °C menor que a temperatura superficial do sistema FI. No período noturno, às 21:00 h, o efeito da inércia térmica foi evidente nos sistemas SO e CV, que se apresentam mais aquecidos que os demais, em torno de 2,4 °C a 6,1 °C, respectivamente.

Quadro 4 - Imagens termográficas internas das coberturas às 3:00 h, 9:00 h, 15:00 h e 21:00 h



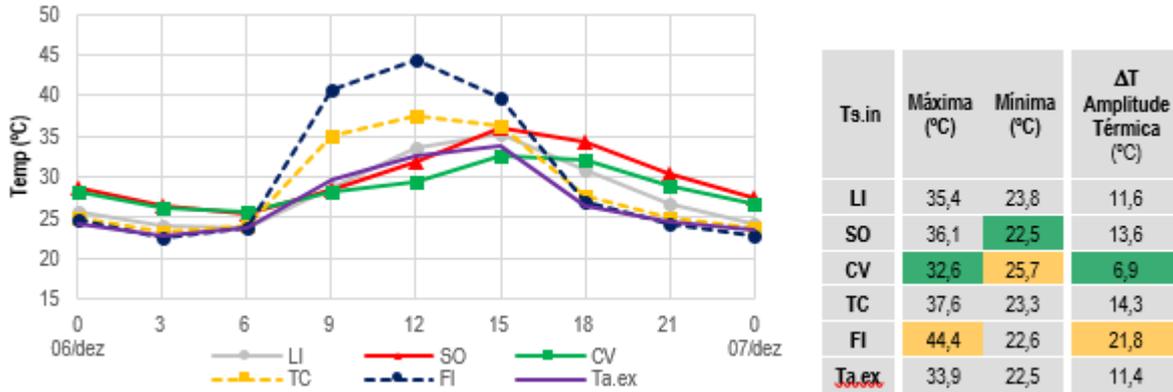
Fonte: Elaborado pelos autores.

Sabe-se que após o período de exposição à radiação solar, o calor armazenado nas coberturas é emitido por radiação para o interior do ambiente. Assim, devido aos sistemas SO e CV possuírem maior massa térmica que os demais, os mesmos armazenam maior quantidade de calor e retardam sua transmissão para o interior, o que explica suas menores $T_{s.in}$ durante o dia e maiores valores no início do período noturno.

O comportamento da temperatura superficial interna ($T_{s.in}$), expresso na Figura 6, destaca os sistemas SO e CV com valores bastante próximos entre si durante a madrugada, enquanto LI, TC e FI se aproximam da temperatura do ar externo ($T_{a.ex}$). No período diurno, as células teste com laje (LI, SO e CV) aqueceram mais lentamente e alcançam pico de temperatura às 15:00 h, enquanto os demais sistemas (TC e FI) alcançaram o pico às 12:00 h, uma defasagem de 3 h dos picos de temperatura nos sistemas de coberturas com laje em relação aqueles com telha. O sistema FI (telha de fibrocimento) apresentou o menor aquecimento no período noturno, porém com temperaturas mais elevadas durante o dia, seguido por TC, LI, SO e CV. O único sistema de cobertura que apresentou amplitude térmica

diária menor que a amplitude térmica externa (11,4 °C) foi a cobertura vegetada (6,9 °C), apresentando diferença de amplitude térmica na ordem de 14,9 °C em relação ao sistema com telha de fibrocimento (21,8 °C).

Figura 6 - Gráfico do comportamento da Ts.in nas células teste, valores máximos e mínimos da Ts.in e amplitude térmica das coberturas

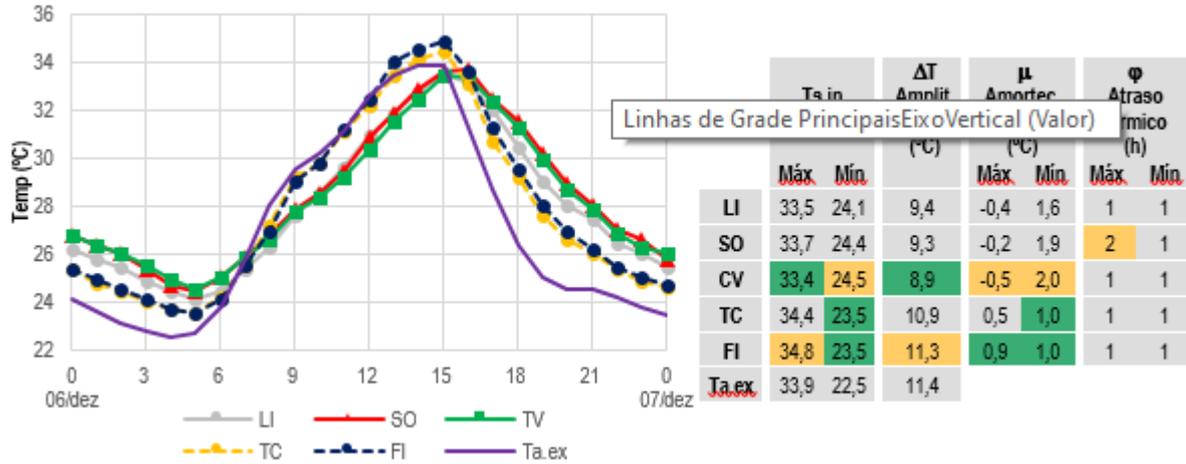


Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados de temperatura do ar interno (Ta.in) são apresentados na Figura 7 e mostram grande influência da massa térmica no comportamento térmico interno do ambiente. Os sistemas com telha (TC e FI) apresentaram valores próximos entre si, comportando-se semelhantes e próximos à temperatura do ar externo (Ta.ex), mostrando-se serem menos propícios ao controle das condições extremas externas, quando comparados às demais coberturas analisadas. Os sistemas SO e CV também apresentaram valores bastante próximos durante todo o período de monitoramento, com variações de apenas 0,45 °C – o que não ocorreu com as temperaturas superficiais externas (Ts.ex) e internas (Ts.in), que chegaram a 3,5 °C e 12,2 °C, respectivamente.

A menor amplitude térmica da temperatura do ar interno foi alcançada no sistema com cobertura vegetada (8,9 °C), enquanto que a maior foi registrada na telha de fibrocimento (11,3 °C), bastante próxima à amplitude térmica externa (11,4 °C). O maior amortecimento térmico das máximas diárias Ta.in foi observada no sistema CV. De modo inverso, o sistema FI apresentou-se mais aquecido que o ar externo na ordem de 0,9 °C. Em relação ao atraso térmico, quase todas as coberturas apresentaram atraso de 1 h nos picos máximos e mínimos de temperatura do ar interno. Apenas o sistema com solo nu (SO) obteve um atraso de 2 h na máxima Ta.in, devido à maior massa térmica.

Figura 7 - Gráfico do comportamento da Ta.in nas células teste, valores máximos e mínimos da Ta.in, amplitude, amortecimento e atraso térmico das coberturas



Fonte: Elaborado pelos autores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de coberturas vegetadas nos telhados das edificações é uma solução eficiente quanto ao desempenho térmico das coberturas, já comprovado por muitos autores na literatura, principalmente para localidades de clima mais frio e temperado. Entretanto, em climas quentes e secos – com o clima da região do semiárido –, esse sistema apresenta algumas dificuldades de implantação devido, especialmente, à escassez de água para irrigação das plantas, elemento básico para manter a vegetação. Os dados apresentados nesse artigo consideraram duas variáveis principais: temperatura superficial da cobertura (Ts.ex e Ts.in) e temperatura do ar interno (Ta.in). Apesar das diferenças observadas nos comportamentos das células teste analisadas, pode-se concluir que o sistema com cobertura vegetada apresentou satisfatório desempenho térmico entre os sistemas analisados, principalmente na redução da amplitude térmica diária.

Cabe destacar, ainda, que o comportamento interno da temperatura do ar no sistema laje impermeabilizada com solo nu (SO) – apesar de ter apresentado altas temperaturas superficiais externas – apresentou desempenho térmico interno semelhante à cobertura vegetada (CV), indicando o papel da massa térmica da cobertura, neste caso atraído ao substrato, nos resultados de temperatura do ar no interior das células teste. Desse modo, pode representar uma alternativa com baixo custo de manutenção em relação à cobertura vegetada.

REFERÊNCIAS

ASSIS, Eleonora S. de; SIRQUEIRA, Camila A. de; BAMBERG, Angelina M. Influência da vegetação no microclima em ambiente simulado controlado. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., ENCONTRO LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2013. Brasília. Anais... Brasília: 2013. CD-ROM

BASTOS, Camila Ribeiro da Silva et al. Uma análise e proposta de implantação de telhado verde e reaproveitamento de água da chuva para uma residência de luxo na região metropolitana de Belo Horizonte. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 6, n. 4, p. 18961-18996, apr. 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n4-169. ISSN 2525-8761. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/8713>>. Acesso em: 12 dez. 2020.

BEATRICE, Caio Cury. Avaliação do potencial de uso de três espécies vegetais como cobertura leve de telhados em edificações. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-22092011-151752/pt-br.php>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

CHAGOLLA-ARANDA, M.A. et al. Effect of irrigation on the experimental thermal performance of green roof in a semi-warm climate in Mexico. *Energy and Buildings*, v. 154, p. 232-243, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.082>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881732412X>>. Acesso em: 21 ago. 2019.

DORNELLES, K. A. Refletância solar de tintas frias e convencionais para cobertura e os impactos da exposição ao intemperismo natural. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2015, [Campinas]. Anais eletrônicos [...]. [Campinas]: PUC, 2015. CD-ROM.

FERRAZ, Iara Lima. O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em com-paração ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica. 2012. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7842/JOBIM,%20ALAN%20LAMBERTI.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 09 nov. 2019.

FLIR. FLIR i3, FLIR i5, FLIR i7, Extech IRC30 Manual do utilizador. 2010. Disponível em: <https://www.eletopecas.com/_uploads/ProdutoDownload/produto_6419.pdf>. Acesso em: 20 out. 2019.

GARTLAND, Lisa. Ilhas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. Tradução Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina dos Textos, 2010.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia e Estatística. Consulta Dados da Estação Automática: Arapiraca (AL). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 11 nov. 2019.

KOTTERK, Markus; GRIESER, Jürgen; BECK, Christoph; RUDOLF, Bruno; RUBEL, Frank. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, Berlim, v. 15,

p. 259-263, jun. 2006. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130. Disponível em: <<http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm>>. Acesso em: 06 set. 2020.

KOZMHINSKY, Marcelo; PINHEIRO, Sara Maria Gomes, EL-DEIR, Soraya Giovanetti. Telhados verdes: uma iniciativa sustentável. Recife: EDUFRRPE, 2016. 65p.

LOHMANN, Alberto; BARTH, Fernando. Análise comparativa de desempenho térmico em coberturas na região de Florianópolis. In: ENCONTRO NACIONAL, 10., ENCONTRO LA-TINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 6., 2009. [Natal]. Anais eletrônicos... [Natal], 2009. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/encac/files/2009/ENCAC09_0971_977.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2019.

LOPES, Daniele Arantes Rodrigues. Análise do comportamento térmico de uma cobertura verde leve (CVL) e diferentes sistemas de cobertura. 2007. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-11122007-093813/pt-br.php>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

MICHELS, Caren; GÜTHS, Saulo; SILVA, Luana Castro da. Desempenho térmico de uma cobertura verde testada em bancada experimental. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 11, p. 92254-92266, nov. 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n11-579. ISSN 2525-8761. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/20514/16399>>. Acesso em: 12 dez. 2020.

MINK, Gernot. Techos verdes: planificación, ejecución, consejos prácticos. Montecideo. Fin de Siglo, [2003?]. 86p.

ONSET. HOBO® Pro v2 (U23-00x) Maexpostal. Disponível em: <https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/10694-Q%20U23%20Manual.pdf>. Acesso em: 30 maio 2019a.

_____. HOBO® Temp/RH 3.5% Data Logger (UX100-003) Maexpostal. Disponível em: <<https://www.onsetcomp.com/support/manuals/16209-f-ux100-003-manual>>. Acesso em: 30 maio 2019b.

OSUNA-MOTTA, Iván; HERRERA-CÁCERES, Carlos; LÓPEZ-BERNAL, Oswaldo. Techo plantado como dispositivo de climatización pasiva en el trópico. Revista de Arquitectura, Bogotá, v. 19(1), p. 42-55, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2017.19.1.1109>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/320051127_Techo_plantado_como_dispositivo_de_climatizacion_pasiva_en_el_tropico>. Acesso em: 21 ago. 2019.

PARIZOTTO FILHO, Sergio. Telhado vegetado. In: LAMBERTS et al. Casa eficiente: bioclimatologia e desempenho térmico. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010, v. 1. p. 89-122. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_I_WEB.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2019.

PECK, Steven W. et. al. Greenbacks from green roofs: forcing a new industry in Canada status report on benefits, barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology diffusion. Canadá: Canada Mortgage and Housing Corporation, 1999. Disponível em: <<https://www.nps.gov/tps/sustainability/greendocs/peck-sm.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2019.

PERUSSI, Rafael; VECCHIA, Francisco Arthur da Silva. Análise do comportamento térmico de um sistema de cobertura verde utilizando plataformas de teste. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, SP, v. 7, n. 4, p.255-236, dez. 2016. ISSN 1980-6809. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v7i4.8647932>. Disponível em: <<http://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8647932>>. Acesso em: 24 jan. 2020.

PROJETEEEE. *Projetando Edificações Energeticamente Eficientes*, 2019. Disponível em: <<http://projeteee.mma.gov.br/>>. Acesso em 25 set. 2019.

RAPOSO, Fausto Miguel Ferreira. *Manual de boas práticas de coberturas verdes. Análises de casos de estudo*. 2013. 187 f. Dissertação (Mestrado em Construção e Reabilitação) – Técnico Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395146020357/Dissertacao_CobVerdes_FRaposo_R01.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2019.

SANTOS, Gilles Chaves dos. *Desempenho térmico de telhados verdes no agreste pernambucano*. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) da Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016. Disponível em: <<https://www3.ufpe.br/ppgecam/images/documentos/Dissertacoes/2016/dissertacao%20gilles.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2019.

SILVA, Mônica Ferreira da. *Estratégias bioclimáticas para seis cidades alagoanas: contribuições para a adequação da arquitetura ao clima local*. 2019. 185 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

SILVA, Neusiane da Costa. *Telhado verde: sistema construtivo de maior eficiência e menor impacto ambiental*. Belo Horizonte: 2011. Monografia. Escola de Engenharia da UFMG, 2011. Disponível em: <<http://pos.demc.ufmg.br/novocecc/trabalhos/pg2/73.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SUDENE. Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste. *Delimitação do semiárido Alagoas*. [S. I.]: ODNE, 2017. 1 mapa, color. Disponível em: <<http://www.sudene.gov.br/images/arquivos/semiario/arquivos/alagoas-delimitacaosemiario-dezembro2017.jpeg>>. Acesso em: 09 jun. 2019.

_____. *Delimitação do semiárido*. Website. 2020. Disponível em: <<http://www.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido>>. Acesso em: 09 jan. 2019.

VECCHIA, Francisco. *Estudo comparativo do comportamento térmico de quatro sistemas de cobertura. Um estudo experimental frente ao calor*. São Carlos: 2005. Disponível em: <http://www1.eesc.usp.br/ppgsea/files/Ref2011_Estudo_comparativo_do_comportamento_termico_INTERNET.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2019.

WILKINSON, Sara; FEITOSA, Renato Castiglia. Retrofitting housing with lightweight green roof technology in Sydney, Australia, and Rio de Janeiro, Brazil. *Sustainability, Basel*, v. 7, p. 1081-1098, 2015. DOI: 10.3390/su7011081. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/276238057_Retrofitting_Housing_with_Lightweight_Green_Roof_Technology_in_Sydney_Australia_and_Rio_de_Janeiro_Brazil>. Acesso em: 21 nov. 2019.