

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

COMPARATIVO ENTRE O COMPORTAMENTO TÉRMICO DE COBERTURA VERDE EXTENSIVA E COBERTURA DE FIBROCIMENTO NO CLIMA DA CIDADE DE SÃO LEOPOLDO, BRASIL

Matheus Sbardelotto Baldo ¹

Bruna Liliâne Brenner ^{1,2}

* Marco Aurélio Stumpf González ³

Andrea Parisi Kern ¹

COMPARATIVE BETWEEN THERMAL BEHAVIOR OF GREEN EXTENSIVE ROOF AND FIBROCIMENT ROOF IN THE CLIMATE OF THE CITY OF SÃO LEOPOLDO, BRAZIL

Recibido el 10 de agosto de 2018; Aceptado el 15 de junio 2019

Abstract

Solutions for the thermal performance enhancement and the energy consumption reduction in buildings have been studied in recent years. The use of green roofs, characterized as a multi-layer horizontal sealing system required for a plant complex cultivation, has been presented as a solution with benefits for some types of climate. The study aims to evaluate the thermal performance of this coverage type in São Leopoldo, southern Brazil, compared to a conventional fiber-cement roof. Two experimental prototypes were constructed in this city. The first is representative of a conventional cover in fiber cement 6mm and the second have a green roof. The analysis was performed through measurements of thermal variables with specific sensors. The variation of the external and internal roofs surface temperatures and the variations of the internal air temperatures of both prototypes were evaluated and it was compared with the variations of the air temperature and the global solar radiation of the external environment. After the data collection and analysis of the results, it was verified that the prototype with green roof showed significantly lower daily thermal oscillations in relation to the reference prototype. During the day, warmer period, temperatures were lower relative to the reference prototype and during the night, colder period, were higher. The green roof had a significant capacity to delay and dampen the external thermal amplitude, which contributed to the thermal regulation inside the environment, a favorable feature for the region of study in the period evaluated.

Keywords: sustainable construction, green roof, thermal behavior, energy efficiency.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos / Faculdade da Serra Gaucha, Bento Gonçalves, RS, Brasil.

³ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil.

*Autor correspondente: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
Email: mgonzalez@unisinos.br

Resumo

Soluções que visam ampliar o desempenho térmico e reduzir o consumo energético em edificações têm sido estudadas nos últimos anos. A utilização de coberturas verdes, caracterizadas como um sistema de vedação horizontal composto por multicamadas necessárias para o cultivo de um conjunto vegetal, tem sido apresentada como uma solução com diversos benefícios para variados tipos de clima. O estudo tem como objetivo avaliar o desempenho térmico deste tipo de cobertura para o clima da cidade de São Leopoldo, no sul do Brasil, comparando com uma cobertura de fibrocimento convencional. Foram construídos dois protótipos experimentais. O primeiro representa uma cobertura convencional em fibrocimento 6mm e o segundo tem a cobertura verde. A análise foi realizada através de medições de variáveis térmicas com sensores específicos. Avaliou-se a variação das temperaturas superficiais externas e internas das coberturas e as variações das temperaturas do ar interno de ambos os protótipos e comparou-se com as variações da temperatura do ar e da radiação solar global do meio externo. Após a coleta dos dados e análise dos resultados verificou-se que o protótipo com cobertura verde apresentou oscilações térmicas diárias significativamente menores em relação ao protótipo referência. Durante o dia, período mais quente, as temperaturas foram menores, em relação ao protótipo referência e durante a noite, período mais frio, foram maiores. A cobertura verde apresentou significativa capacidade de atrasar e amortecer a amplitude térmica externa, o que contribuiu para a regulação térmica no interior do ambiente, característica favorável para a região de estudo no período avaliado.

Palavras chave: construção sustentável, cobertura verde, comportamento térmico, eficiência energética.

Introdução

Importante parte do consumo de energia elétrica nas edificações residenciais e comerciais brasileiras tem origem na busca por maior conforto térmico através de soluções de condicionamento artificial. Por este motivo as edificações apresentam potencial de redução do consumo energético através da ampliação do desempenho térmico (Brasil, 2005; Lamberts et al., 2014; Roaf et al., 2013). Na avaliação de desempenho térmico de uma edificação horizontal os sistemas de cobertura são vistos como um dos pontos mais críticos. O ganho de calor de uma edificação térrea advém, aproximadamente 70 % da cobertura e 30 % das fachadas. Durante o dia a superfície da cobertura ganha calor a partir do efeito conjugado entre a temperatura do ar e a radiação solar, o que pode conferir à cobertura temperatura superficial de até 80 °C. Durante a noite, com a queda da temperatura externa, ocorrem perdas de calor pelo processo de radiação, o que pode conferir à superfície da cobertura temperatura inferior à do ambiente (Cavalcanti e Prado, 2001; Ikematsu, 2007).

O estudo investiga o comportamento térmico de cobertura verde para o clima da cidade de São Leopoldo, situada ao sul do Brasil, verificando seus possíveis benefícios comparativamente a uma cobertura de fibrocimento convencional com espessura de 6mm. O estudo foi conduzido através de medições de temperatura superficial e ambiente em protótipos em escala reduzida.

Revisão bibliográfica

A cobertura verde, também conhecida como telhado verde, ecotelhado, telhado vivo, green roof ou biocobertura, é um sistema composto por multicamadas capazes de garantir a subsistência de um determinado grupo vegetal sobre a cobertura de uma edificação. O perfil construtivo deste sistema pode variar conforme a tecnologia adotada em função das condições do ambiente de aplicação e das exigências das espécies vegetais plantadas. Geralmente o arranjo básico de uma cobertura verde possui como estratos a estrutura de suporte impermeabilizada, a camada de drenagem, a camada filtrante, a camada antirraiz, o substrato e a cultura vegetal (Ohnuma Jr., 2008; Roaf et al., 2013).

Koc et al. (2018), Shooshtarian et al. (2018) e Simard et al. (2019) apresentam revisões da literatura sobre o uso de infraestruturas verdes como meio de adaptação às mudanças climáticas, avaliando especialmente para o escoamento e manejo de águas pluviais. Esses autores sugerem a adoção de medidas de planejamento urbano que integrem infraestruturas verdes, reconhecendo e valorizando-os como um meio de melhorar a resiliência urbana e ampliar a capacidade de adaptação às mudanças climáticas

Lamberts et al. (2010) apontam como principais benefícios associados à utilização de coberturas verdes para o meio urbano: o gerenciamento do escoamento pluvial, a mitigação dos efeitos das ilhas de calor, a melhoria da qualidade do ar, a diminuição do estresse urbano e a criação de novas paisagens na morfologia urbana; e para a edificação: a melhoria do comportamento térmico e acústico e o aumento da vida útil da cobertura. Mendes (2014), Perussi (2016) e Silva (2017) consideram a influência da vegetação nas coberturas para a mitigação de problemas climáticos urbanos, com a redução de ilhas de calor, benefícios econômicos, redução de poluição e retenção de águas pluviais.

A opção de utilização de coberturas verdes tem sido explorada em alguns estudos, que indicam diferentes efeitos benéficos, incluindo ampliação do conforto térmicos e acústico, bem como a absorção de CO₂ (Freitas et al., 2017; Galbrun e Scerri, 2017; Koc et al., 2017; Pereira, 2014; Wang et al., 2014; Zeng et al., 2017). No Brasil, Pouey (1998), Ferraz (2012) e Costa et al. (2015) estudaram os efeitos da aplicação de sistemas de cobertura verde em protótipos. Mais especificamente, podem ser citados os estudos de Morelli (2016) e Pan et al. (2018).

Morelli (2016) avaliou a influência de foram mensurados os impactos em temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, temperatura superficial internas e externas das paredes e da cobertura; apresentando diferenças significativas entre os protótipos. A pesquisa forneceu indicações sobre a eficiência da parede verde como segunda pele na redução do ganho de calor. Verificou que a vegetação na envoltória não impediu a passagem do ar, apenas diminui sua velocidade.

Pan et al. (2018) desenvolveram um estudo avaliando os efeitos da orientação solar no desempenho térmico em ambientes de teste, com e sem sistemas de vegetação vertical em Hong Kong. As temperaturas da parede, do ar externo e do ar interior foram medidas e comparadas. Os efeitos da temperatura média do ar, radiação solar, luz solar total, umidade relativa do ar, cobertura de nuvens e velocidade do vento nos indicadores térmicos também foram explorados. A orientação solar induziu efeitos significativos nas temperaturas máximas diárias das paredes. No geral, o uso de vegetação no ambiente construído pode trazer benefícios de resfriamento passivo para ambientes internos e externos.

A instalação de sistemas de cobertura verde sobre coberturas convencionais é uma solução que pode auxiliar na melhoria do comportamento térmico das edificações. Devido à absorção da radiação solar pelas vegetações, ao processo de evapotranspiração e à elevada inércia térmica das camadas constituintes, as coberturas verdes contribuem para a minimização das flutuações térmicas, o que garante a estabilização da temperatura interna do ambiente tanto em períodos frios quanto em períodos quentes (Ferreira, 2007). As coberturas verdes são alternativas tecnológicas que oferecem variadas possibilidades de execução, tanto por possuírem composição em multicamadas quanto por poderem ser executadas com metodologias e elementos locais, o que configura uma alternativa viável em âmbito construtivo (Lopes, 2007). Segundo Matheus et al. (2016) e Mendes (2014) a vegetação é uma alternativa interessante para o controle térmico passivo em edificações. Sendo utilizada em fachadas e nas coberturas, apresenta um efeito positivo sobre as correntes de calor no envelope, reduzindo os ganhos de calor e proporcionando maior conforto aos usuários.

A utilização de coberturas verdes, segundo Gutiérrez (2008), promove benefícios ambientais, econômicos e sociais. Os benefícios ambientais incluem controle de precipitações, redução da contaminação da água da chuva, reconstrução da paisagem natural, conservação de energia, melhoria da qualidade do ar, redução de ruído, mitigação do efeito de ilha de calor e aumento da biodiversidade. Os efeitos sociais são estéticos e sociológicos. Os efeitos econômicos incluem aumento da durabilidade da cobertura, possível redução de tarifas locais de serviço, incentivos públicos, incremento do valor comercial, produção de alimentos e geração de renda.

Materiais e métodos

A utilização de revestimentos vegetais é uma alternativa interessante. Existe uma dependência das características climáticas, sugerindo a realização de estudos locais, na investigação detalhada dos efeitos sobre as edificações.

A avaliação do comportamento térmico foi realizada a partir de medições e análise de variáveis térmicas relacionadas a protótipos físicos, um com cobertura verde e outro com telhado de fibrocimento. As características dos protótipos são apresentadas na Figura 1, indicando as

dimensões e os detalhes da execução da cobertura verde. Os protótipos foram construídos no interior do Campus da Universidade, conforme Figura 2a. O clima de São Leopoldo é subtropical úmido caracterizado por apresentar as menores médias térmicas e as maiores amplitudes térmicas anuais do Brasil. Suas estações são bem definidas, com invernos frios e verões quentes (Sene e Moreira, 2012).

Os dois protótipos foram construídos sobre base de concreto de 10 cm de espessura (Figuras 1 e 2b).

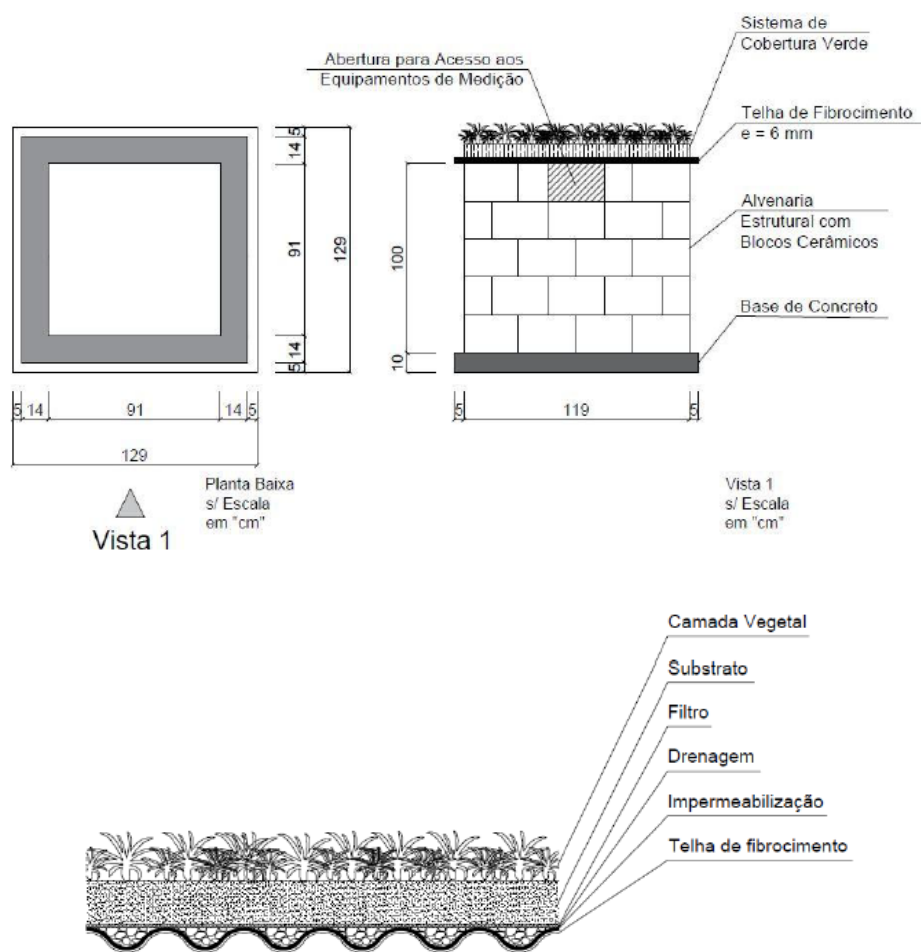


Figura 1. Características dos protótipos e composição da cobertura verde



Figura 2. Protótipos: (a) Localização, (b) Implantação

Os sistemas de vedação vertical dos protótipos foram executados com paredes de alvenaria de blocos cerâmicos, com dimensões unitárias de 14 cm x 19 cm x 29 cm, assentados com juntas horizontais e verticais de argamassa de 1 cm de espessura, com revestimento de pintura com tinta acrílica branca. Ambos, quadrados, foram executados com as dimensões internas de 91 cm de lado e 100 cm de altura. As coberturas, quadrada, foram executadas com dimensões de 129 cm de lado. Não foram consideradas aberturas significativas (com exceção da abertura para acesso aos equipamentos internos, com dimensões de 19 cm de altura e 29 cm de comprimento), revestimento argamassado nas faces internas e externas das paredes, pintura nas faces internas das paredes, forro, subcobertura e revestimento de piso.

Os protótipos foram concebidos de forma a possuírem condições similares, caracterizados pelas igualdades de: posicionamento em relação à orientação solar, dimensões, materiais e métodos construtivos.

A cobertura dos protótipos foi executada com telhas de fibrocimento de 6 mm de espessura, com inclinação de 5 %, sobre estrutura de madeira maciça de cedrinho, apoiada nas paredes de

alvenaria. As ondas das telhas e as demais aberturas foram vedadas com EPS e PU expandido. Para a cobertura verde, como impermeabilização, foram dispostas, nas faces superiores das telhas, duas camadas de lona plástica de PE de 90 μm , a fim de evitar a infiltração de água no interior do protótipo. Como invólucro das camadas seguintes, foi elaborado um recipiente de madeira cedrinho de 2.54 cm de espessura, 10 cm de altura e 119 cm de lado. Como sistema de drenagem, foi disposta uma camada de argila expandida com a finalidade de coletar e remover a água excedente incidida no sistema. Acima, como camada filtrante, foi colocada uma camada de manta geotêxtil, com o propósito de evitar a passagem do substrato pela camada de drenagem. O substrato utilizado foi constituído pela composição, em volume, de aproximadamente 60 % de terra adubada e 40 % de serragem, em uma camada de 10 cm de espessura. A mistura foi realizada para conferir a diminuição da carga incidente na cobertura. Como camada vegetal, foi utilizada a vegetação nativa, encontrada no próprio local do experimento, uma vez que está acostumada às condições ambientais locais, o que promove o aumento da vida útil do sistema, a baixa manutenção e o equilíbrio ecológico. Optou-se por não utilizar camada antirraiz, posto que as raízes deste tipo de vegetação são curtas e não apresentam risco de punção e invasão às demais camadas.

A partir das pesquisas de Pouey (1998) e Brenner (2017), foi definido o método de aquisição dos dados referentes aos protótipos e ao meio ambiente. Os dados foram adquiridos durante os dias 21, 22 e 23 de outubro de 2016. O registro ocorreu de forma ininterrupta, com intervalos entre medições de 10 min, durante 72 h. Seguindo o trabalho de Pouey (1998), definiu-se a coleta simultânea das seguintes variáveis: temperatura superficial externa e interna das coberturas ($^{\circ}\text{C}$), temperatura do ar interno dos protótipos ($^{\circ}\text{C}$), temperatura do ar externo ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar global (W/m^2). Em cada protótipo foram instalados um sensor de temperatura superficial em um ponto imediatamente abaixo da cobertura e outro imediatamente acima da cobertura e um sensor de temperatura do ar no centro geométrico do volume interno do protótipo, além de um sensor de temperatura do ar na área externa. A variável ambiental externa de radiação solar global foi registrada pela estação meteorológica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Unisinos, localizada aproximadamente a 265 m de distância do local de implantação dos protótipos.

Com adaptação à pesquisa de Brenner (2017), definiu-se a coleta das variáveis de temperatura com os seguintes equipamentos: três sensores Datalogger Tinytag Ultra 2, em modelo apresentado na Figura 3a, para as medições de temperatura do ar interno dos dois protótipos e temperatura do ar externo, e quatro sensores DS18B20 revestidos com capa de alumínio (para evitar contato direto com a umidade), para as medições de temperaturas superficiais internas e externas.

Os sensores Tinytag Ultra 2 (Figura 3a), dispositivos móveis com sistemas próprios de bateria e armazenamento de dados, foram retirados do recinto ao final do período de monitoramento para

que os dados coletados fossem descarregados, por meio de cabo USB, para um computador, para serem gerenciados pelos *softwares* Tinytag Explorer e MS-Excel. Os sensores de temperatura superficial foram acoplados, através de cabos, a um sistema automatizado de coleta e armazenamento de dados, desenvolvido a partir de uma plataforma de prototipagem eletrônica Arduino, apresentada na Figura 3b, alimentado por bateria de 12v, 7Ah (Blum, 2013; McRoberts, 2010; Pearce, 2013).

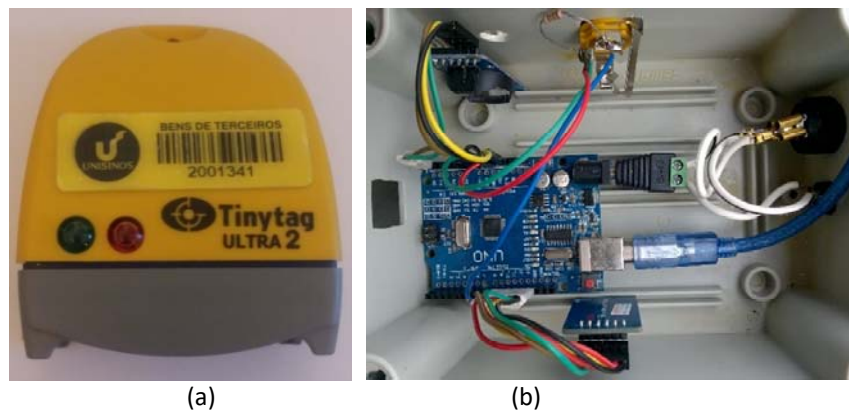


Figura 3. Instrumentação: (a) Datalogger Tinytag Ultra 2, (b) Datalogger baseado em plataforma Arduino

A configuração baseada em baterias foi necessária pela indisponibilidade de rede de energia no local dos protótipos, o qual, por sua vez, foi escolhido por não possuir no entorno construções que pudessem gerar sombra ou reflexões (Figura 2a). O dispositivo foi desenvolvido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Unisinos.

Os dados foram descarregados da plataforma através do cartão de memória para um computador e gerenciados pelo software MS-Excel. O sistema ficou protegido contra intempéries no interior do protótipo com telhado de fibrocimento. Os dados da radiação solar global foram obtidos a partir do piranômetro da Estação Meteorológica da Unisinos.

Resultados e discussão

Temperaturas Superficiais Externas das Coberturas

A Figura 4 apresenta os registros das temperaturas superficiais externas da cobertura verde e do telhado de fibrocimento, bem como as variações da temperatura do ar e da radiação solar global. As máximas temperaturas das superfícies externas tiveram registro no dia 23 de outubro, quando o telhado de fibrocimento atingiu 50.75 °C e a cobertura verde 30.75 °C, o que aponta uma diferença de até 20 °C entre os picos máximos. As mínimas temperaturas das superfícies externas tiveram registro no dia 22 de outubro, quando o telhado de fibrocimento atingiu 8.63 °C e a

cobertura verde 12.63 °C, o que aponta uma diferença de até 4 °C entre os picos mínimos. Em um mesmo instante de medição, a maior diferença entre as temperaturas superficiais externas das coberturas foi de 20.82 °C, no dia 23 de outubro, quando a temperatura do telhado de fibrocimento atingiu 49.13 °C e a temperatura da cobertura verde 28.31 °C.

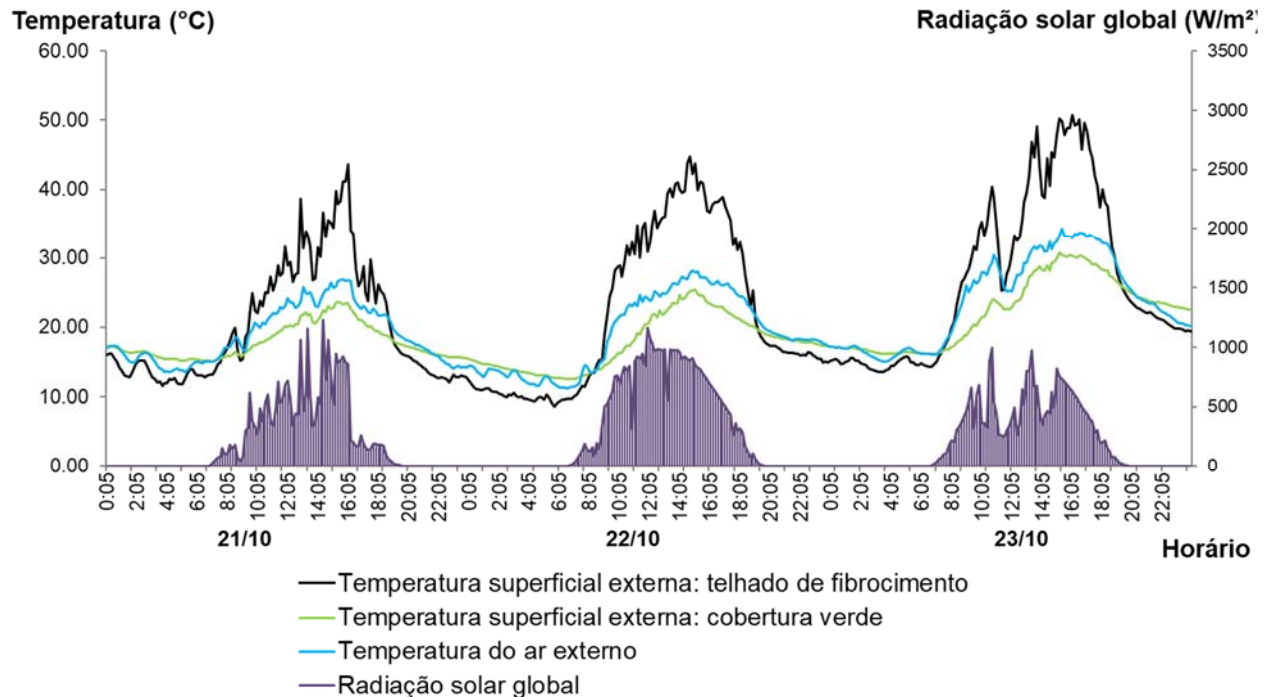


Figura 4. Temperaturas superficiais externas, temperatura do ar externo e radiação solar global

As maiores amplitudes térmicas diárias das superfícies externas ocorreram no dia 23 de outubro, quando a variação térmica do ar externo foi de 19.22 °C e a máxima radiação solar global, 955 W/m². Enquanto a maior amplitude térmica da superfície externa do telhado de fibrocimento foi de 37.19 °C, a maior amplitude térmica da superfície externa da cobertura verde foi de 14.56 °C. As menores amplitudes térmicas diárias das superfícies externas ocorreram no dia 21 de outubro, quando a variação térmica do ar externo foi de 13.37 °C e a máxima radiação solar global, 1,229 W/m². Enquanto a menor amplitude térmica da superfície externa do telhado de fibrocimento foi de 32 °C, a menor amplitude térmica da superfície externa da cobertura verde foi de 8.63 °C.

Temperaturas Superficiais Internas das Coberturas

A Figura 5 apresenta os registros das temperaturas superficiais internas das coberturas da cobertura verde e do telhado de fibrocimento, bem como as variações da temperatura do ar e da radiação solar global. As máximas temperaturas das superfícies internas tiveram registro no dia

23 de outubro, quando o telhado de fibrocimento atingiu 37 °C e a cobertura verde 25.75 °C, o que aponta uma diferença de até 11.25 °C entre os picos máximos. As mínimas temperaturas das superfícies internas tiveram registro no dia 22 de outubro, quando o telhado de fibrocimento atingiu 10.88 °C e a cobertura verde 13.81 °C, o que aponta uma diferença de até 2.93 °C entre os picos mínimos. Em um mesmo instante de medição, a maior diferença entre as temperaturas superficiais externas das coberturas foi de 17 °C, no dia 22 de outubro, quando a temperatura do telhado de fibrocimento atingiu 32.69 °C e a temperatura da cobertura verde 15.69 °C.

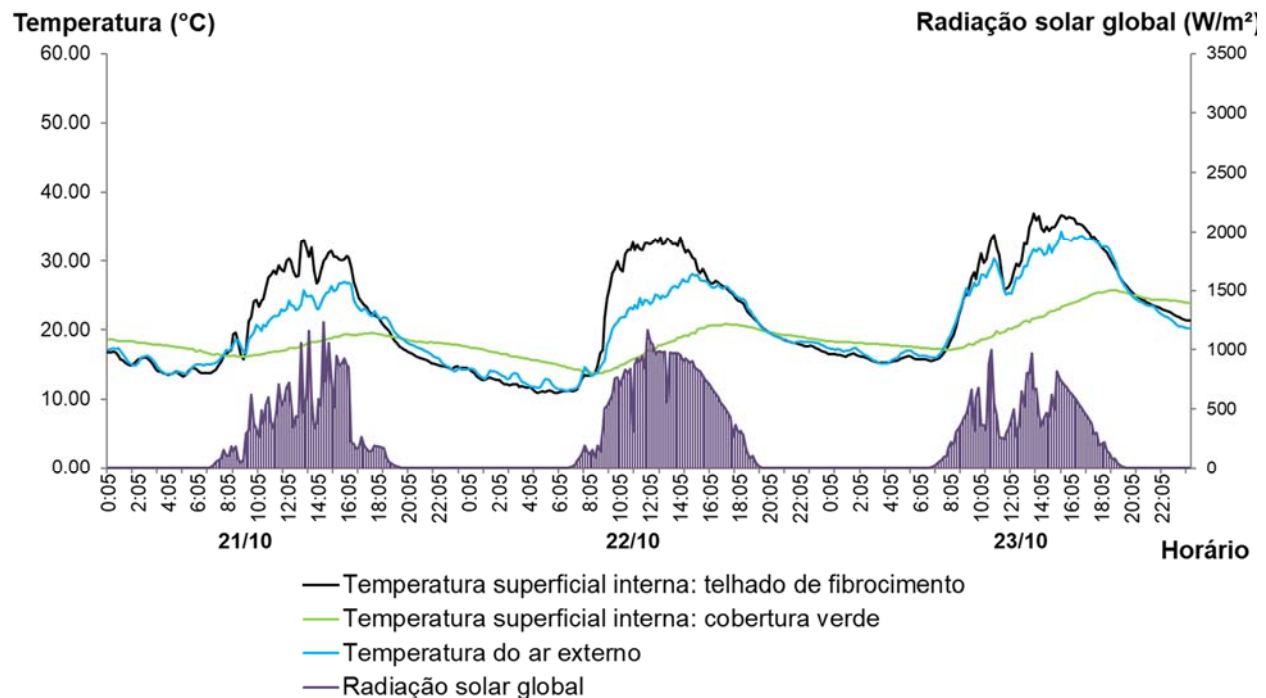


Figura 5. Temperaturas superficiais internas, temperatura do ar externo e radiação solar global

A maior amplitude térmica diária da superfície interna do telhado de fibrocimento foi de 22.62 °C e ocorreu no dia 22 de outubro, quando a variação térmica do ar externo foi de 16.96 °C e a máxima radiação solar global, 1,164 W/m². A maior amplitude térmica diária da superfície interna da cobertura verde foi de 8.63 °C e ocorreu no dia 23 de outubro, quando a variação térmica do ar externo foi de 19.22 °C e a máxima radiação solar global, 995 W/m². As menores amplitudes térmicas diárias das superfícies internas ocorreram no dia 21 de outubro, quando a variação térmica do ar externo foi de 13.37 °C e a máxima radiação solar global, 1,229 W/m². Enquanto a menor amplitude térmica da superfície interna do telhado de fibrocimento foi de 19.88 °C, a menor amplitude térmica da superfície interna da cobertura verde foi de 3.44 °C.

Quanto aos parâmetros relacionados à inércia térmica: atraso térmico (no contexto: tempo que transcorre entre uma variação térmica do ar externo e sua manifestação na superfície interna da cobertura) e coeficiente de amortecimento térmico (no contexto: razão entre a amplitude térmica da superfície interna da cobertura e amplitude térmica do ar externo), o dia 23 de outubro apresentou os valores mais significativos de análise, de modo que na cobertura verde o atraso térmico resultou em 3 h 20 min e o coeficiente de amortecimento térmico 0,45. Tais parâmetros não puderam ser estabelecidos para o telhado de fibrocimento, posto que a manifestação da variação térmica na superfície interna ocorreu em um período anterior à manifestação no meio externo, ademais, a amplitude da variação térmica da superfície interna foi superior à amplitude do meio externo.

Temperaturas do Ar Interno dos Protótipos

A Figura 6 apresenta os registros das temperaturas do ar interno dos protótipos com cobertura verde e telhado de fibrocimento, bem como as variações da temperatura do ar externo e da radiação solar global.

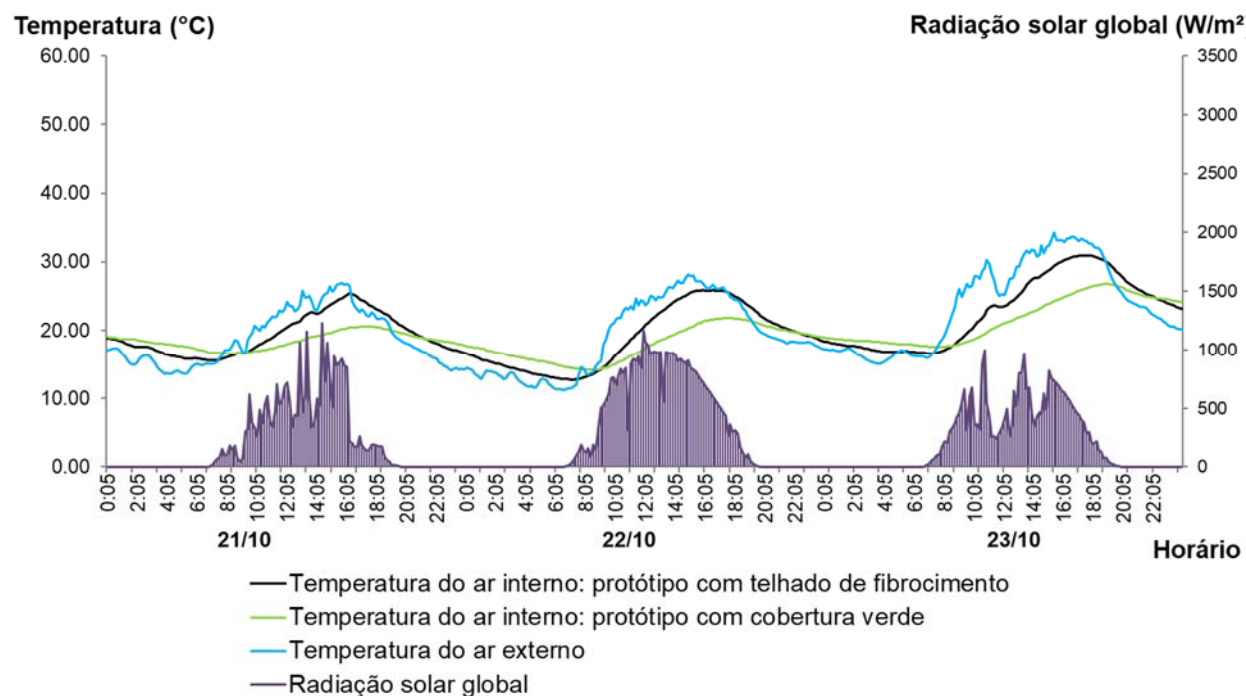


Figura 6. Temperaturas do ar interno, temperatura do ar externo e radiação solar global

As máximas temperaturas do ar interno dos protótipos tiveram registro no dia 23 de outubro, quando o telhado de fibrocimento atingiu 30.94 °C e a cobertura verde 26.8 °C, o que aponta uma diferença de até 4.14 °C entre os picos máximos. As mínimas temperaturas do ar interno dos

protótipos tiveram registro no dia 22 de outubro, quando o telhado de fibrocimento atingiu 12.75 °C e a cobertura verde 14.21 °C, o que aponta uma diferença de até 1.46 °C entre os picos mínimos. Em um mesmo instante de mensuração, a maior diferença entre as temperaturas internas dos protótipos foi de 5.35 °C, no dia 23 de outubro, quando a temperatura do ar interno do protótipo com telhado de fibrocimento atingiu 30.39 °C e a temperatura da cobertura verde 25.04 °C.

As maiores amplitudes térmicas diárias do ar interno dos protótipos ocorreram no dia 23 de outubro, quando a variação térmica do ar externo foi de 19.22 °C e a máxima radiação solar global, 955 W/m². Enquanto a maior amplitude térmica do ar interno do protótipo com telhado de fibrocimento foi de 14.31 °C, a maior amplitude térmica do ar interno do protótipo com cobertura verde foi de 9.20 °C. As menores amplitudes térmicas diárias do ar interno ocorreram no dia 21 de outubro, quando a variação térmica do ar externo foi de 13.56 °C e a máxima radiação solar global, 1,229 W/m². Enquanto a menor amplitude térmica do ar interno do protótipo com telhado de fibrocimento foi de 9.86 °C, a menor amplitude térmica do ar interno do protótipo com cobertura verde foi de 3.99 °C.

Temperaturas Internas e Radiação Solar Global

A Figura 7 apresenta a diferença entre os valores das temperaturas superficiais internas das coberturas e das temperaturas do ar interno dos protótipos, bem como as variações da radiação solar global.

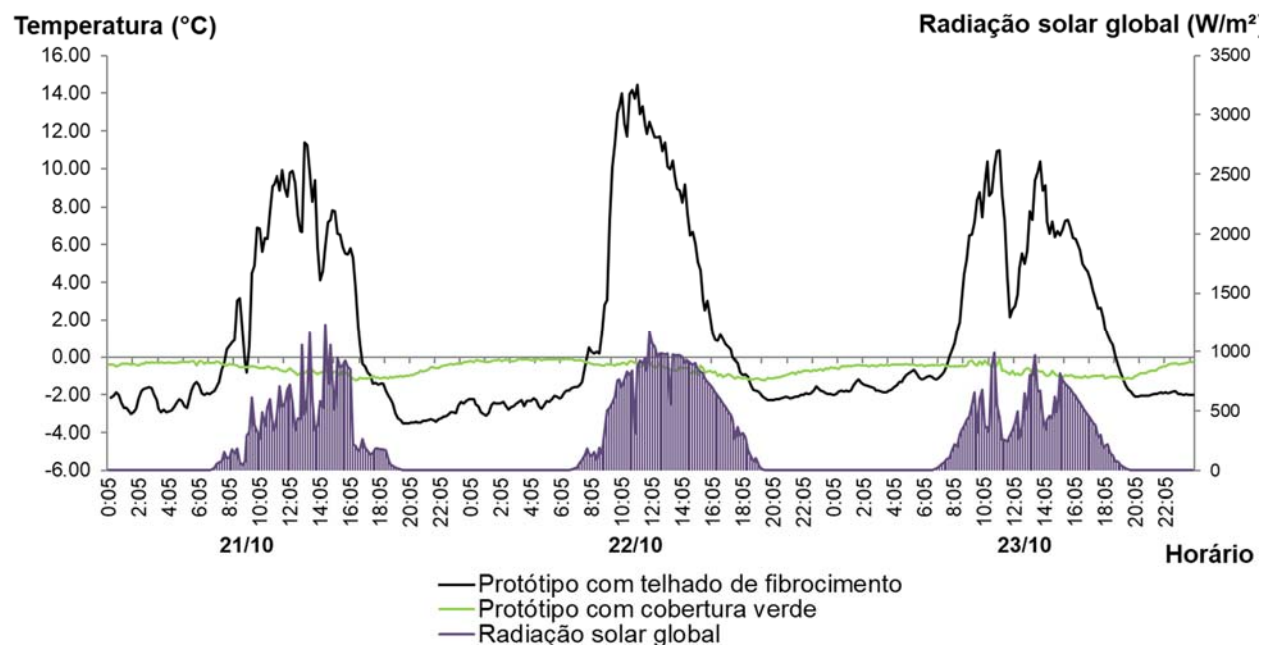


Figura 7. Diferença entre as temperaturas superficiais internas e as temperaturas do ar interno e radiação solar global

As diferenças entre os valores das temperaturas superficiais internas das coberturas e do ar interno dos ambientes indicam o sentido do fluxo de calor, de modo que quando a resultante da subtração for positiva o fluxo ocorre da superfície interna para o ar interno e quando for negativa, o fluxo ocorre do ar interno para a superfície interna. Quanto mais extremos forem os valores, maior será a diferença entre as temperaturas do ar e as temperaturas das superfícies.

A partir de uma análise gráfica, notou-se que no protótipo com telhado de fibrocimento a série das diferenças das temperaturas teve tendência a acompanhar a intensidade da radiação solar global. Os maiores níveis de radiação solar global ocasionaram maiores temperaturas sob a telha que no ar interno, o que indicou que nestes períodos o sentido do fluxo de calor foi da superfície da cobertura para o interior do protótipo. Já os menores níveis de radiação solar global ocasionaram menores temperaturas sob a telha que no ar interno, o que indicou que nestes períodos o sentido do fluxo de calor foi do interior do protótipo à superfície da cobertura.

No protótipo com cobertura verde o comportamento foi distinto. Em nenhum instante do período a diferença entre as temperaturas superficiais internas e as temperaturas do ar interno do protótipo foram positivas, o que indicou que o sentido do fluxo de calor sempre ocorreu do ar interno do protótipo para superfície interna da cobertura. Com o crescimento dos níveis de radiação solar global houve decréscimo da série de valores das diferenças, que perdurou até os níveis diminutos, quase nulos, de radiação solar global, quando então começou a crescer. A intensidade da transferência de calor do ar interno à superfície interna da cobertura aumentou à medida que a radiação solar global diminuiu.

Discussão

As variáveis medidas no estudo (temperatura superficial externa, temperatura superficial interna e temperatura do ar interno) apresentaram valores máximos e mínimos diários com menor amplitude no protótipo com cobertura verde que no protótipo com telhado de fibrocimento, ou seja, no protótipo com cobertura verde as amplitudes das variações térmicas diárias e do período ocorreram de forma menos acentuada. A cobertura verde apresentou significativa capacidade de atrasar e amortecer as amplitudes das variações térmicas do ar externo. O calor que incidiu na superfície externa da cobertura verde durante o dia foi armazenado e transferido gradativamente à sua superfície interna. No telhado de fibrocimento não foi possível estabelecer os parâmetros de inércia térmica, posto que seus valores resultantes ocorreram fora da faixa admissível de análise (o atraso térmico deve resultar um valor positivo e o coeficiente de amortecimento térmico deve apresentar um valor menor que 1). Denotou-se a alta sensibilidade do telhado de fibrocimento às variações da radiação solar global. O calor incidido na superfície externa do telhado de fibrocimento foi quase instantaneamente e integralmente transferido à superfície interna.

No protótipo com telhado de fibrocimento o sentido do fluxo de calor foi descendente (da superfície interna da cobertura para o ar interno) nas horas iniciais da manhã e da tarde, período mais quente e com maior intensidade da radiação solar global, e ascendente (do ar interno à superfície interna da cobertura) durante a noite e madrugada, período mais frio e com menor ou nula intensidade da radiação solar global. O comportamento indicou que o telhado de fibrocimento influenciou significativamente nos ganhos térmicos durante os instantes mais quentes e nas perdas térmicas durante os instantes mais frios. No protótipo com cobertura verde o sentido do fluxo de calor foi ascendente em todo o período analisado. Nas horas iniciais da manhã e da tarde houve maior diferença entre as temperaturas, a superfície interna manteve-se mais fria que o ar interno, e durante a noite e a madrugada houve menor diferença entre as temperaturas, a superfície interna manteve-se, praticamente, com a mesma temperatura que o ar interno. O comportamento indicou que a cobertura verde influenciou nas perdas térmicas durante os instantes mais quentes e quase não apresentou significância quanto às perdas térmicas durante os instantes mais frios.

Conclusões

Durante o período de análise a cobertura verde apresentou as menores oscilações térmicas em suas superfícies interna e externa, isto é, a cobertura mostrou-se menos suscetível às variações climáticas e meteorológicas. Por conseguinte, a temperatura do ar interno do protótipo com este tipo de cobertura permaneceu também mais estável durante o período de medições, ou seja, contribuiu para o amortecimento da amplitude térmica do ambiente externo. A técnica construtiva se apresenta como alternativa de sistema passivo capaz de contribuir para a melhoria do comportamento térmico no interior de edificações, o que induz a minimização da utilização de dispositivos para o condicionamento térmico artificial e, por consequência, a redução no consumo de energia.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FAPERGS, da CAPES e do CNPq.

Referências

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013a) *NBR 15575: Edificações Habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais*, ABNT, Rio de Janeiro.
- Blum, J. (2013) *Exploring Arduino: Tools and techniques for engineering wizardry*, John Wiley & Sons, New York. ISBN: 978-1-118-54936-0
- Brasil (2005) *Eficiência energética em habitações de interesse social*. Caderno 9. Ministério das Cidades/ Ministério de Minas e Energia, Brasília. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: <http://www.capacidades.gov.br/media/doc/acervo/0066461c89da56194e35a9a0c2acacdc.pdf>

- Brenner, B. L. (2017) *Avaliação da utilização de isolantes térmicos no interior das cavidades de blocos cerâmicos componentes de alvenarias de vedação externa para o clima de São Leopoldo, RS*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Brasil. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/6324>
- Cavalcanti, J. R. S., Prado, R. T. A. (2001) Estudo experimental comparativo entre resfriamento evaporativo e radiativo em ambientes cobertos com telhas de fibrocimento em região de clima quente e úmido. *Boletim técnico da escola politécnica da USP*, **302**. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00302.pdf
- Costa, B. S., Coelho, G. T. F., Pereira, D. R. (2015) Estudo da influência do telhado de verde, como material empregado em construção, sobre a temperatura. *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia - CONTECC'2015*. Fortaleza, Brasil.
- Ferraz, I. L. (2012) *O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica*. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-07062013-144209/publico/laraLimaFerraz_CoberturasVerdes.pdf
- Ferreira, M. F. (2007) Teto Verde: O uso de coberturas vegetais em edificações. *Seminário de iniciação científica PUC-RIO*, 15. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2007/relatorios/art/art_manoela_de_freitas_ferreira.pdf
- Freitas Jr, J de A., Sanquetta, C R., Iwakiri, S., Costa, M R M M., Koehler, H S. (2017) Estudo da aplicação de coberturas verdes no objetivo de se construir edifícios neutros em carbono. *Holos Environment*, **17**, 1, 35-52. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: <https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/11494>
- Galbrun, L., Scerri, L. (2017) Sound insulation of lightweight extensive green roofs. *Building and Environment*, **116**, 130-139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.008>
- Gutiérrez, R. A. I. (2008) Techos vivos extensivos: Una práctica sostenible por descubrir e investigar en Colombia. *Alarife: Revista de Arquitectura*, 21-36. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3195349>
- Ikematsu, P. (2007) *Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes*. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: http://www.pcc.usp.br/files/text/thesis/2007_12_Paula_Ikematsu_KAI.pdf
- Koc, C. B., Osmond, P., Peters, A. (2018) Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources. *Solar Energy*, **166**, 486-508. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.008>
- Koc, C. B., Osmond, P., Peters, A. (2017) Towards a comprehensive green infrastructure typology: a systematic review of approaches, methods and typologies. *Urban Ecosystems*, **20**, 1, 15-35. doi: <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0578-5>
- Lamberts, R., Dutra, L., Pereira, F. O. R. (2014) *Eficiência Energética na Arquitetura*. 3ed., PW Editores. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: http://labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf
- Lopes, D. A. R. (2007) *Análise do comportamento térmico de uma cobertura verde leve (CVL) e diferentes sistemas de cobertura*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-11122007-093813/publico/Dissertacao_DanielaArantes.pdf
- Matheus, C., Caetano, Fernando D. N., Morelli, D. D. de O., Labaki, L. C. (2016) Desempenho térmico de envoltórias vegetadas em edificações no sudeste brasileiro. *Ambiente Construído*, **16**, 1, 71-81. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000100061>

- McRoberts, M. (2010) *Beginning Arduino*, New York, APRESS, 2010. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4302-3241-4>
- Mendes, B. H. E. (2014) *Tetos verdes e políticas públicas: uma abordagem multifacetada*. Dissertação de Mestrado, FAU-Universidade de São Paulo, São Paulo. doi: <http://dx.doi.org/10.11606/D.16.2014.tde-12092014-142822>.
- Morelli, D. D. de O. (2016) *Desempenho de paredes verdes como estratégia bioclimática*. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/321174>
- Ohnuma, Jr., A. A. J. (2008) *Medidas não convencionais de reservação d'água e controle da poluição hídrica em lotes domiciliares*. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-13032009-093755/pt-br.php>
- Pan, L., Wei, S., Chu, L. M. (2018). Orientation effect on thermal and energy performance of vertical greenery systems. *Energy and Buildings*, **175**, 102-112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.024>
- Pearce, J.M. (2013) *Open-Source Lab: How to Build Your Own Hardware and Reduce Research Costs*, Elsevier, Amsterdam. doi: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-07249-3>.
- Pereira, M. F. B. (2014) *Conteúdo energético e emissões de CO2 em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: Estudo de caso*. Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil. <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7851>
- Perussi, R. (2016) *Comportamento térmico de um sistema de cobertura verde: um experimento utilizando plataformas de teste*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi: <http://dx.doi.org/10.11606/D.18.2017.tde-27012017-153824>.
- Pouey, M. T. F. (1998) *Estudo experimental do desempenho térmico de coberturas planas*. Vegetação e terraço. Dissertação de mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/119132>.
- Roaf, S., Fuentes, M., Thomas, S. (2013) *Ecohouse: A design guide*. 4thed. Routledge, Oxon, UK.
- Sene, E., Moreira, I. G. (2012) *Geografia geral e do Brasil. O espaço geográfico e globalização*. 5ed. São Paulo: Scipione.
- Shooshtarian, S., Rajagopalan, P., Sagoo, A. (2018) A comprehensive review of thermal adaptive strategies in outdoor spaces. *Sustainable cities and Society*, **41**, 647-665. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.005>
- Silva, T. F. D. (2017) *Tecnologia alternativa em drenagem urbana: telhado verde*. Dissertação (Mestrado), Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco. Acesso em 7 de julho de 2020, disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/26040>
- Simard, C., L'Ecuyer-Sauvageau, C., Bissonnette, J. F., Dupras, J. (2019) Le rôle des infrastructures naturelles pour la gestion des eaux de ruissellement et des crues dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques. *Le Naturaliste Canadien*, **143**, 1, 25-31. doi: <https://doi.org/10.7202/1054114ar>.
- Wang, Y., Bakker, F., Groot, R. de, Wörtche, H. (2014) Effect of ecosystem services provided by urban green infrastructure on indoor environment: A literature review. *Building and Environment*, **77**, 88-100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.021>.
- Zeng, C., Bai, X., Sun, L., Zhang, Y., Yuan, Y. (2017) Optimal parameters of green roofs in representative cities of four climate zones in China: a simulation study. *Energy and Buildings*, **150**, 118-131. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.079>.