

DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE COBERTURAS VEGETADAS EM CLIMA SUBTROPICAL

THERMAL AND ENERGY PERFORMANCE OF ROOF VEGETATION IN SUBTROPICAL CLIMATE

Tatiane Ballerini Fernandesⁱ
Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil, tatifafe18@hotmail.com

Roseana Bonotto Ruivoⁱⁱ
Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil, roseanabonotto@hotmail.com

Eduardo Grala da Cunhaⁱⁱⁱ
Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil, eduardogralacunha@yahoo.com.br

Lisandra Fachinello Krebs^{iv}
Lund University, Lund, Sweden, liskrebs@gmail.com

Resumo

Este artigo apresenta o desempenho térmico de diferentes coberturas vegetadas aplicadas em um edifício de escritórios na cidade de Pelotas-RS, Zona Bioclimática Brasileira 2, observando, a partir do comportamento dos fechamentos opacos e transparentes, a contribuição das diferentes soluções vegetadas para o plano horizontal. O edifício condicionado artificialmente possui 187,50 m², configurando seis zonas térmicas, e foi simulado no software *Energy Plus 8.4.0*. Como alternativas às coberturas vegetadas – configuradas em quatro alturas de substrato – foram utilizados outros três modelos de cobertura: fibrocimento com laje de 10 cm em concreto – com e sem isolamento térmico de poliestireno extrudado – e fibrocimento com superfície externa pintada de branco. O estudo buscou determinar qual dessas coberturas é a mais eficiente energeticamente, através da avaliação dos resultados do consumo de energia e da análise do fluxo térmico no edifício. A cobertura vegetada de maior espessura de substrato (50 cm) apresentou melhor resultado, com consumo energético de 84,3 kWh/m².ano. Já a cobertura de laje com telha de fibrocimento convencional foi responsável pelo maior dispêndio energético: 103,5 kWh/m².ano. As coberturas vegetais apresentaram melhor desempenho que as demais em função das elevadas capacidade e resistência térmica e dos aspectos voltados a evapotranspiração e consequentes trocas de calor latente. Este trabalho almeja contribuir no melhor entendimento do desempenho termoenergético das coberturas vegetadas.

Palavras-chave: cobertura vegetada, eficiência energética, desempenho termoenergético.

Abstract

This article presents the thermal performance of different models of green roofs applied to an office building in the city of Pelotas–RS, Brazilian Climatic Zone 2, observing the contribution of the different vegetated solutions applied to the horizontal plane, regarding the behavior of the opaque and transparent closures. The building is artificially conditioned and has 187,50 m², configuring six thermal zones, and was simulated with the software Energy Plus 8.4.0. As alternatives to the green roofs – configured in four substrate heights –, three other roof models were tested: asbestos cement with a 10 cm concrete slab – with and without thermal insulation of extruded polystyrene – and asbestos cement painted with white color. The study sought to determine which roof is more energy efficient, based on the evaluation of the energy consumption results and the analysis of the thermal flow in the building. The building with the green roof with higher substrate layer depth (50 cm) presented the best performance, with an energy consumption of 84.3 kWh/m².year. The building with the conventional asbestos cement roof was responsible for the higher energy consumption: 103.5 kWh/m².year. The green roofs presented a better performance due to their thermal capacity and insulation capacity and due to aspects related to evapotranspiration and consequent latent heat exchanges. This work aims to contribute to a better understanding of the thermal energy performance of green roofs.

Keywords: Green roofs, energy efficiency, thermal-energetic performance.

How to cite this article:

FERNANDES, Tatiane Ballerini et al. Desempenho termoenergético de coberturas vegetadas em clima subtropical. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 9, n. 4, p. 262-275, dez. 2018. ISSN 1980-6809. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650882>>. Acesso em: 21 nov. 2018. doi:<https://doi.org/10.20396/parc.v9i4.8650882>.

Introdução

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2017), no Brasil o consumo de energia elétrica nas edificações residenciais corresponde a aproximadamente 21,4% do total da eletricidade consumida no país. A busca por edifícios mais eficientes energeticamente tem norteado pesquisas visando o melhor desempenho térmico e energético das edificações. Lamberts, Dutra e Pereira (2014) relatam que a eficiência energética na arquitetura pode ser entendida como um atributo inerente à edificação, representante de seu potencial em prover conforto térmico, visual e acústico aos usuários com baixo consumo de energia. Um edifício é mais eficiente que outro energeticamente quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia. Os elementos determinantes do desempenho térmico das edificações são as paredes, a cobertura e as esquadrias, denominadas envolvente. Desta forma, o bom desempenho térmico de uma edificação está diretamente relacionado aos materiais opacos e transparentes que compõem a sua envoltória, pois é por meio deles que ocorrem as maiores trocas de calor entre os ambientes externo e interno.

A cobertura vegetada, tema central deste artigo, desponta como um sistema com potencial de melhoria do desempenho termoenergético de edificações. Segundo Kwok e Grondzik (2013), ela auxilia na retenção e absorção da chuva, na diminuição do efeito “ilha de calor” urbano, na melhoria da qualidade do ar e na diminuição do consumo de energia na edificação (refrigeração e/ou aquecimento). Além destes, possui benefícios como o aumento da área verde útil, e influência sobre a temperatura interna das edificações, diminuindo sua perda de calor no inverno e reduzindo seu ganho no verão.

Este estudo busca, por intermédio de uma análise comparativa, caracterizar o desempenho termoenergético de sete configurações de cobertura em um edifício térreo de escritórios, localizado na cidade de Pelotas-RS. A comparação do uso da cobertura vegetada (com diferentes espessuras de substratos) ao de coberturas de laje de concreto e telha de fibrocimento (com e sem isolamento térmico e com pintura branca), busca apurar seu desempenho termoenergético, de maneira a determinar qual a cobertura mais eficiente. Para isto, foi realizada uma análise do consumo energético anual da edificação.

Fundamentação

O benefício proporcionado pelas coberturas vegetadas em meio urbano, com maior atenção em estudos

internacionais, é a contribuição para a redução do consumo energético, de acordo com Feng e Hewage (2014), Jaffal, Ouldboukhitine e Belarbi (2012) e Langston (2015), juntamente com a retenção de águas pluviais proporcionada por este sistema.

O comportamento higrotérmico de coberturas vegetadas tem sido estudado internacionalmente há vários anos, tanto em experimentos, por exemplo os realizados por Emilsson (2008), Coma *et al.* (2016) e Scharf e Zluwa (2017); como em simulações computacionais feitas por Sailor (2008), Jaffal, Ouldboukhitine e Belarbi (2012) e Boafó e Kim (2017).

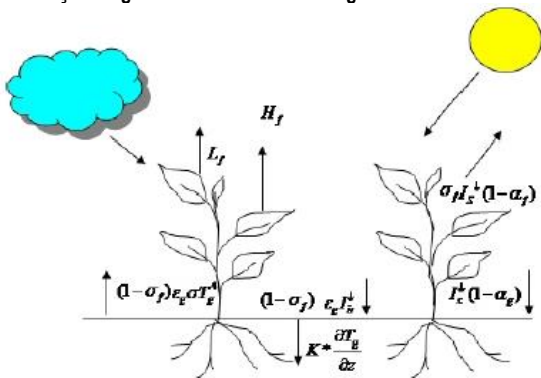
Estudos com coberturas vegetadas têm demonstrado que, considerando as temporadas quente e fria em climas diversos, quando dotadas das configurações apropriadas, essas coberturas tendem a apresentar desempenho térmico satisfatório.

Jaffal, Ouldboukhitine e Belarbi (2012) simularam no *software TRNSYS* uma residência unifamiliar de 100 m² para os climas das cidades de La Rochelle, França (mediterrâneo temperado); Atenas, Grécia (mediterrâneo quente) e Estocolmo, Suécia (temperado), pelo período de um ano. Os autores compararam o desempenho de uma cobertura convencional bem isolada (provida de telhas sanduíche) com uma cobertura vegetada extensiva (espécie *Sedum*) com substrato entre 10 e 15 cm de profundidade. No estudo para a cidade La Rochelle, o fluxo de calor pelo telhado foi avaliado no verão, em que a cobertura vegetada demonstrou o efeito de resfriamento esperado; e no inverno, em que a cobertura foi responsável pela redução das perdas de calor nos dias frios. A temperatura do ar interno com a cobertura vegetada foi reduzida em até 2°C no verão e o consumo energético anual foi reduzido em 6%, indicando que as coberturas vegetadas são benéficas para aquele clima. Em Atenas e Estocolmo o consumo energético também foi reduzido. No clima quente de Atenas a demanda diminuiu principalmente devido aos efeitos do sombreamento e evapotranspiração proporcionados pela vegetação. No clima frio de Estocolmo a redução de consumo se deu pelo efeito de isolamento adicional proporcionado pela camada de substrato. Neste caso, as temperaturas do substrato vegetal mantiveram-se até 5,6°C mais altas que a temperatura externa.

Uma cobertura vegetal, diferentemente de uma cobertura convencional, apresenta o componente calor latente em seu balanço energético. O efeito da evapotranspiração nos resultados é notório, além de desempenhar um importante papel na liberação de calor latente, de acordo com Bastiaanssen *et al.* (1998). A quantificação da

evapotranspiração nas coberturas vegetadas possui relação direta com a espécie vegetal e a altura das plantas, sendo que variáveis como a arquitetura foliar (distribuição espacial da folhagem, resistência interna da planta ao transporte de água e outros fatores morfológicos como número, tamanho e distribuição dos estômatos) diferem de planta para planta, conforme indicado por Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002). Este índice é um parâmetro chave para se determinar uma série de processos ecológicos como fotossíntese e evapotranspiração, ajudando a medir a taxa de crescimento da planta e influenciando diretamente na interceptação e absorção da luz, assim como no balanço das trocas de calor e taxas de evaporação com a atmosfera. Duarte (2015) sinaliza que à medida que a planta vai crescendo aumenta a quantidade de CO₂, estimulando cada vez mais a evapotranspiração. O efeito da evapotranspiração é analisado com base nos dados de entrada necessários, para considerar a influência na temperatura interna das edificações, sendo elas: a temperatura do solo do substrato na cobertura vegetada, a temperatura da vegetação e a incidência solar, que influenciam nos índices de calor latente obtidos após a simulação computacional. USDOE (2016) apresenta de forma pormenorizada o balanço energético de uma cobertura vegetada ilustrada pelo desenho esquemático do Manual de Engenharia do software Energy Plus, conforme a Figura 1. O componente L_f caracteriza as trocas de calor latente a partir da evapotranspiração da vegetação. Os demais componentes caracterizam o calor sensível (trocas por radiação, convecção e condução do solo e da vegetação).

Figura 1 - Balanço energético de uma cobertura vegetada no software Energy Plus



Fonte: USDOE (2016)

Onde:

I_s – radiação solar de onda curta (W/m^2);

I_{iv} – radiação solar de onda longa (W/m^2);

A_f – refletância de ondas curtas da vegetação;

α_s – absorvância de ondas curtas do solo;

α_v – absorvância de ondas curtas da vegetação;

ϵ_f – emissividade da vegetação;

ϵ_s – emissividade do solo;

σ – constante de Stefan-Boltzmann ($5.699 \cdot 10^{-8} W/m^2.K^4$)

T_s – temperatura do solo;

T_f – temperatura da vegetação;

H_f – fluxo de calor sensível entre a vegetação e o ar;

H_s – fluxo de calor sensível entre o solo e o ar;

L_f – fluxo de calor latente da vegetação;

L_s – fluxo de calor latente do solo;

K – transmitância térmica do solo.

Na Figura 1 observam-se os seguintes processos de transferência de calor numa cobertura, conforme descrito por Dias (2016):

- Absorção de radiação de ondas curtas pela vegetação e pelo substrato; $I_s(1 - \alpha_v)$ e $I_s(1 - \alpha_s)$;
- Trocas por radiação de ondas longas entre a vegetação e o céu e entre o substrato e o céu; $\epsilon_v I_{iv} - \epsilon_v \sigma T_v^4$ e $\epsilon_s I_{iv} - \epsilon_s \sigma T_s^4$;
- Trocas por radiação de ondas longas entre a vegetação e o céu e entre as folhas e o substrato $\frac{\sigma \epsilon_s \epsilon_v \sigma}{\epsilon_1} (T_s^4 - T_v^4)$;
- Trocas por convecção entre a vegetação, o substrato e o ambiente externo, incluindo o ar “aprisionado” entre a camada de vegetação e o substrato - H_v e H_s ;
- Fluxos de calor latente contabilizados como a evaporação da umidade do solo e a transpiração realizada pela vegetação. - L_v e L_s
- Trocas por condução no substrato - $K \times \frac{\delta T_s}{\delta z}$.

O estudo analisando o desempenho térmico de coberturas vegetadas desenvolvido por Dias (2016) foi realizado através de simulações para três cidades brasileiras: Curitiba-PR, Brasília-DF e Belém-PA. Como alternativas à cobertura vegetal foram utilizadas uma cobertura convencional de fibrocimento ($U= 3,63 W/m^2.K$ e $\alpha = 0,75$) e outra semelhante, com superfície externa pintada de branco ($U=3,63 W/m^2.K$ e $\alpha=0,20$). O autor analisou o balanço térmico para estas coberturas pelo período de um ano. Todas as coberturas possuíam laje armada em blocos cerâmicos de espessura total de 12 cm (laje mista). As

coberturas de fibrocimento convencional e com pintura branca usadas como referência foram configuradas com a laje acima descrita, uma câmara de ar de 10 cm de espessura e telha de fibrocimento com 8 mm de espessura. A cobertura vegetada foi configurada com a laje mista, vegetação com 5, 10, 20, 50 e 100 cm e os substratos com 5, 10, 15, 25 e 50 cm. Essa composição de cobertura mostrou melhor desempenho térmico nos três climas simulados durante o ano todo, pois quando comparados os resultados com a cobertura de referência, as reduções de cargas térmicas foram de 83% (102,1 kWh/m².ano) em Belém, 89% (78,3 kWh/m².ano) em Curitiba e 95% (72,4 kWh/m².ano) em Brasília. A evapotranspiração foi constatada como parcela fundamental para o melhor desempenho térmico da cobertura vegetada em situações de demanda por resfriamento. No período de inverno, a cobertura vegetada dificultou os ganhos de calor por condução e, nessa circunstância, houve demanda por aquecimento nos ambientes.

Outro estudo no âmbito das coberturas vegetadas foi realizado por Liz (2016), na qual uma análise experimental do comportamento térmico de um telhado vegetado em Florianópolis-SC (ZB3) foi desenvolvido, com a finalidade de identificar os elementos componentes de uma cobertura vegetal capazes de atuar beneficemente no processo de transferência de calor através da cobertura, para este clima. Foram instaladas lajes de concreto que serviram de base para as diferentes configurações de coberturas vegetadas analisadas. Nas coberturas vegetadas variou-se o teor de umidade, a espessura do substrato, e a camada vegetal e isolamento térmico. Os resultados apontaram que a variação na espessura do substrato apresentou resultados mais significativos na redução do ganho de calor do que a variação no teor de umidade. Quando comparada à cobertura de referência de fibrocimento, a redução do ganho de calor foi de 84,1%. Na comparação entre as amostras de cobertura vegetada com diferentes espécies vegetais, a grama “Preta” mostrou reduções significativas no fluxo de calor na superfície de contato, chegando a uma redução de 52,2% em relação à amostra de grama “Sempre verde”. Esta variação foi decorrente das diferentes características físicas e metabólicas das plantas, sendo que os parâmetros da vegetação variam de acordo com a espécie (densidade das folhas, taxas de evapotranspiração, área de sombreamento, etc.) os quais resultam em diferentes taxas de sombreamento do substrato e de evapotranspiração. O acréscimo do isolante térmico reduziu a perda de calor pela cobertura para 61,9%, em média, quando comparado à amostra sem isolamento térmico.

Pode-se notar, pela bibliografia aqui referenciada, que as coberturas vegetadas simuladas demonstraram importante contribuição na redução do fluxo térmico para o interior de um edifício.

Método

O método empregado neste estudo foi a simulação computacional por meio de modelagem no *software SketchUp Make 15*, com o Plugin *Legacy Open Studio* versão 1.0.13 e simulação no *software Energy Plus 8.4.0*. Foi realizada uma análise comparativa entre diferentes soluções de cobertura.

Para a obtenção dos resultados de consumo energético dos modelos, os mesmos foram configurados e simulados com condicionamento artificial, com análise posterior dos fluxos térmicos da edificação.

Definição da zona bioclimática e caracterização dos dias extremos

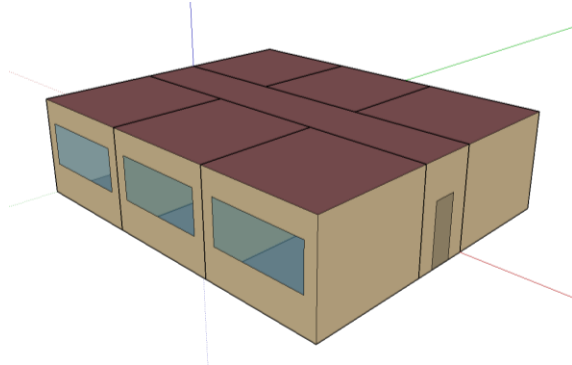
A cidade de Pelotas, RS, está situada na Zona Bioclimática Brasileira 2 (Latitude: 31°46'19" S, Longitude: 52°20'33" W), classificada por Köppen-Geiger, como clima Cfa (subtropical úmido), de acordo com Kottek et al. (2006). Como a cidade ainda não possui arquivo climático próprio, utilizou-se o arquivo disponível para a cidade de Camaquã - Rio Grande do Sul (Latitude: 30°51'04" S, Longitude: 51°48'44" W) localizada na mesma Zona Bioclimática, conforme a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), e com a mesma classificação de Köppen-Geiger. Foi utilizado o arquivo climático elaborado pelo professor Maurício Roriz mediante dados registrados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMet) no período de 2000 a 2010, segundo Roriz (2012).

Para compreender os fluxos térmicos dos fechamentos opacos e transparentes, foram definidos dias extremos quanto às temperaturas máxima e mínima diárias de bulbo seco. A análise dos fluxos térmicos teve como objetivo principal entender o comportamento dos fechamentos opacos e transparentes, procurando justificar os resultados dos diferentes sistemas de coberturas analisados na edificação. Foram extraídas as informações necessárias para calcular as temperaturas médias diárias no arquivo .epw (EnergyPlus Weather File) definindo assim os dias extremos para a análise. Para a simulação em questão, foram utilizados os dias extremos de 5 de junho para inverno e 10 de janeiro para verão. Esses dias foram definidos a partir da análise das temperaturas médias diárias observando o maior valor, dia 10 de janeiro e o menor valor, dia 5 de junho.

Definição das zonas térmicas

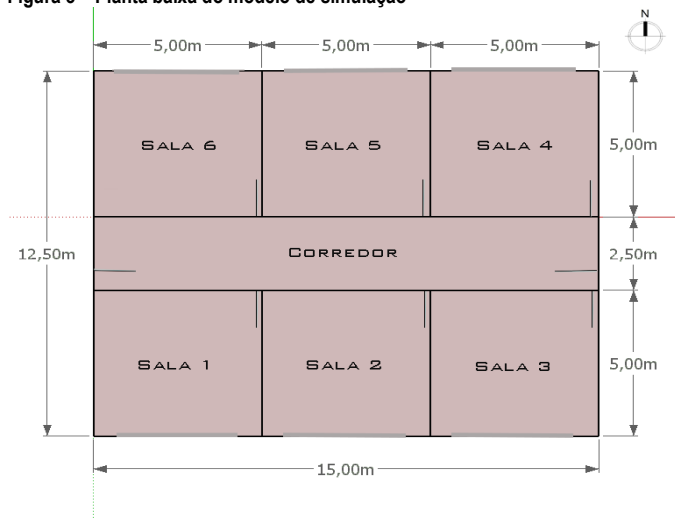
O edifício foi modelado com seis zonas térmicas, sendo todas salas de escritórios de medidas 5,00 m x 5,00 m e pé-direito de 3,50 m. A Figura 2 corresponde ao modelo tridimensional do Google SketchUp e a Figura 3 ilustra a planta esquemática do modelo, com suas dimensões. Para simplificar a entrada de dados, o modelo inicial foi construído com todas as coberturas sem inclinação, posteriormente configuradas no Energy Plus. Com a finalidade de isolar a influência das trocas de calor com o solo, o mesmo foi considerado adiabático. A infiltração de ar foi configurada nas simulações com 0,6 trocas de ar/hora em todas as salas comerciais, conforme orientado por CIBSE (2007).

Figura 2 – Perspectiva do modelo de simulação – SketchUp e Plugin Legacy OpenStudioidio



Fonte: Os autores

Figura 3 – Planta baixa do modelo de simulação



Fonte: Os autores

Configuração do sistema de iluminação, padrão de ocupação e equipamentos

A densidade de potência de iluminação (DPI) foi configurada com base no Regulamento Técnico da

Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) Nível A, utilizando-se o valor de 9,7 W/m². Assim, a necessidade de iluminação pela ocupação se dá nos dias de semana das 8h00min às 12h00min e das 13h30min às 18h00min. Aos sábados, o funcionamento do edifício ocorre das 8h00m às 12h00m. Como fração radiante do sistema de iluminação, foi utilizado o valor de 0,42, conforme o Manual do Energy Plus Input/Output Reference (Energy Plus, 2016), observando a presença de luminárias suspensas.

Para a configuração da ocupação do edifício utilizou-se como base a NBR 16401- Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários, (ABNT, 2008a), contando a densidade de ocupação alta com um posto de trabalho a cada 7,7 m² e 0,14 pessoas/m², com 0,5 para a fração radiante. A definição da taxa dissipada de calor por pessoa também observou a NBR 16401 (ABNT, 2008a), considerando o valor de 130 W/pessoa – trabalho leve.

A configuração da agenda para estimar a carga térmica interna pelo uso dos equipamentos foi a mesma para a ocupação e sistema de iluminação do edifício. Para todas as simulações foi adotado o valor 0,25 para a fração radiante de ganho de calor pelos equipamentos, conforme especificado pela ASHRAE (2009). O valor de 21,5 W/m² foi usado como base para a configuração da densidade de carga interna (DCI) proveniente dos equipamentos.

Propriedades térmicas do envelope

As paredes externas foram configuradas com 2,5 cm de argamassa, 10 cm de lã de vidro, tijolo furado com 3,5 cm de cerâmica de cada lado e câmara de ar com resistência térmica de 0,14 m².K/W, com uma transmitância térmica de 0,24 W/m².K, conforme Figura 4. Com a presença da lã de vidro, as paredes externas se tornam bem isoladas, definindo uma condição de contorno de uma edificação isolada termicamente. A proposta das paredes isoladas procura explorar uma lacuna nos estudos já realizados no Brasil, nos quais as paredes apresentam transmitâncias térmicas mais altas. As propriedades térmicas da maior parte dos materiais usados, tais como condutividade térmica, densidade de massa aparente, calor específico, absorvância à radiação solar e resistência térmica, foram obtidas na norma NBR 15220 (ABNT, 2005a; 2005b). Estes dados são apresentados nas Tabelas 1 e 2. Na Tabela 3 caracterizam-se as transmitâncias térmicas das paredes, pisos e coberturas analisados.

As janelas são metálicas com vidro comum 3 mm. As propriedades do vidro 3 mm são caracterizadas na Tabela 4.

Tabela 1 - Características dos materiais utilizados na simulação computacional.

Material	Espessura (m)	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]	Emissividade	Absortância solar
Argamassa de assentamento e reboco	0,025	1,15	2000	1000	0,90	0,50
Cerâmica	0,035	1	1600	920	-	-
Concreto	0,1	1,75	2200	1000	0,90	0,20
Lã de vidro	0,1	0,025	50	700	-	-
Madeiramento fibrocimento	0,035	0,29	900	1340	0,90	0,50
Poliestireno extrudado	0,04	0,035	30	1420	-	-
Telha de fibrocimento	0,008	0,95	2000	840	0,85	0,75
Telha de fibrocimento pintada de branco	0,008	0,95	2000	840	0,85	0,20
Tijolo furado (parte cerâmica)	0,11	1	1600	920	-	-

Fonte: NBR 15220- Parte 2 (2005) - Anexo B tabelas B.2 e B.3 adaptadas

Tabela 2 - Características dos materiais utilizados na simulação computacional para cobertura verde.

Material cobertura vegetada	Cobertura vegetada (10 cm)	Cobertura vegetada (15 cm)	Cobertura vegetada (25 cm)	Cobertura vegetada (50 cm)
Altura das plantas (m)	0,1	0,2	0,5	1
Índice de área foliar	0,5	1	2	5
Refletividade da folha	0,22	0,22	0,22	0,22
Emissividade da folha	0,95	0,95	0,95	0,95
Resistência mínima dos estômatos (s/m)	180	180	180	180
Rugosidade	média	média	média	média
Profundidade do substrato (m)	0,10	0,15	0,25	0,5
Condutividade no solo seco (W/m.K)	0,35	0,35	0,35	0,35
Densidade do solo seco (kg/m ³)	1100	1100	1100	1100

Fonte: Adaptado de DIAS, 2016

Tabela 3 – Transmitância térmica de paredes e coberturas

Sistemas construtivos	Caracterização dos materiais	Transmitância térmica (W/m ² .K)	Capacidade Térmica (kJ/m ² .K)
Paredes externas	Reboco externo + lâ de vidro 10 cm+ alvenaria cerâmica tijolo furado 8,5 cm + reboco interno	0,24	158
Cobertura vegetada com substrato com 10 cm	Laje de concreto armado com 10 cm + substrato de 10 cm	2,92	354
Cobertura vegetada com substrato com 15 cm	Laje de concreto armado com 10 cm + substrato de 15 cm	2,01	420
Cobertura vegetada com substrato com 25cm	Laje de concreto armado com 10 cm + substrato de 25 cm	1,30	552
Cobertura vegetada com substrato com 50 cm	Laje de concreto armado com 10 cm + substrato de 50 cm	0,67	882
Cobertura de fibrocimento sem pintura	Laje de concreto armado com 10 cm, câmara de ar e telha de fibrocimento	3,63	232
Cobertura de fibrocimento pintada de branco	Laje de concreto armado com 10 cm, câmara de ar e telha de fibrocimento pintada de branco	3,63	232
Cobertura de fibrocimento com isolamento térmico de poliestireno extrudado	Laje de concreto armado com 10 cm, isolamento térmico (poliestireno extrudado – 4 cm), câmara de ar e telha de fibrocimento	0,71	284
Piso com revestimento cerâmico, argamassa de assentamento e laje de concreto armado	Laje de concreto armado com 10 cm, argamassa de assentamento 1,5 cm, revestimento cerâmico com 1 cm	4,75 (considerado como adiabático)	281

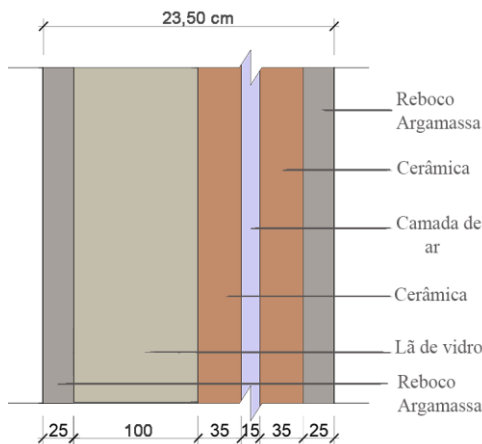
Fonte: Autores

Tabela 4 – Propriedades do vidro 3 mm utilizadas na simulação computacional

Vidro Transparente 3 mm	
Espessura	3 mm
Transmitância solar perpendicular ao vidro	0,837
Refletância solar frontal perpendicular ao vidro	0,075
Refletância solar posterior perpendicular ao vidro	0,075
Transmitância visível frontal perpendicular ao vidro	0,898
Refletância visível frontal perpendicular ao vidro	0,081
Refletância visível posterior perpendicular ao vidro	0,081
Transmitância infravermelho perpendicular ao vidro	0
Emissividade frontal	0,84
Emissividade posterior	0,84
Condutividade térmica (W/m.K)	0,9

Fonte: Autores

Figura 4 – Camadas simplificadas das paredes externas utilizadas na simulação



Fonte: Os autores

Configuração do sistema de climatização artificial

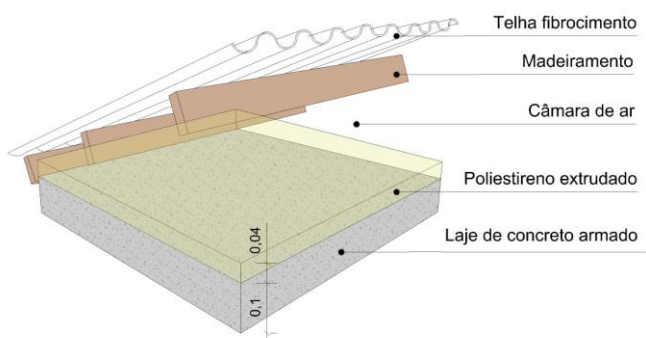
Foi configurado um sistema de expansão direta (split) com coeficiente de performance de 3,24 W/W, observando o nível de eficiência energética “A” do PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem). No HVACTemplate, o

termostato foi regulado para Setpoint de aquecimento de 21°C e Setpoint de resfriamento de 25 °C em todas as zonas térmicas com funcionamento automático, conforme NBR 16401 (ABNT, 2008b). As potências e vazões de aquecimento e refrigeração foram definidas observando a opção Autosize do programa Energy Plus. A renovação do ar interior foi dimensionada em 0,0075 m3/s, observando 27 m3/h.pessoa (BRASIL, 1998).

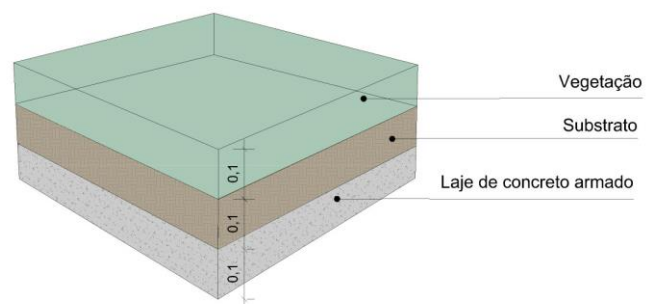
Configuração das coberturas

As coberturas vegetadas foram configuradas com espessuras de substrato de 10, 15, 25 e 50 cm, e altura das plantas com 0,10, 0,20, 0,50 e 1,00 m a fim de identificar os resultados observando a possível redução do consumo energético da edificação (Figura 5). A classe de objetos de entrada disponível no programa Energy Plus no setor Material:RoofVegetation permite diversas opções de design de coberturas vegetadas, incluindo espessura, propriedades térmicas e hídricas do substrato e as características de vegetação como as propriedades térmicas, a resistência estomatal mínima (parâmetro biofísico que rege a capacidade de transpiração da planta), altura e índice de área de foliar. Tais valores foram definidos com base no EnergyPlus Engineering Reference (USDOE, 2016) e em Dias (2016), conforme Tabela 2. O Índice de Área Foliar é um número adimensional calculado considerando-se metade do total da área fotossinteticamente ativa e sua área de projeção no solo (USDOE, 2016). Na Tabela 2 são caracterizadas a altura da vegetação, o índice de área foliar, a emissividade e a refletividade da folha, a altura do substrato, a resistência estomatal, e a condutividade e densidade do solo. Esses valores foram baseados no EnergyPlus Engineering Reference (USDOE, 2016) e em Dias (2016).

Figura 5 – Camadas simplificadas das diferentes configurações de cobertura utilizadas na simulação



Varição de 3 sistemas de cobertura: fibrocimento sem pintura, com isolamento e fibrocimento com pintura branca



Varição de 4 espessuras de substrato: coberturas vegetadas de 10, 15, 25 e 50 cm de substrato + variação proporcional da vegetação

Fonte: Os autores

A cobertura de fibrocimento sem pintura foi caracterizada na Tabela 1. Além do fibrocimento sem pintura, foi simulado o modelo com uma cobertura com superfície externa pintada de branco, com absorvância solar de 0,20, como também o fibrocimento com isolamento térmico sobre laje de concreto armado, com a utilização do poliestireno extrudado de 4 cm com resistência térmica de 0,57 m².K/W (Figura 5).

Análise dos resultados

Com o objetivo de averiguar os principais responsáveis pelos ganhos e as perdas térmicas no interior do edifício durante os períodos de inverno e verão, foram avaliados por meio dos relatórios de saída do programa Energy Plus, as taxas de ganho e perda de calor referentes a cada superfície e o ganho por convecção referente aos sistemas de iluminação, equipamentos e pessoas, além dos ganhos e perdas por infiltração de ar de hora em hora. Somam-se a esses, nas coberturas vegetais, a avaliação também do calor sensível e latente da vegetação e do substrato. Para a configuração do fluxo térmico através das esquadrias e das taxas de infiltração de ar foi realizado o cálculo da diferença entre os dados referentes aos ganhos e perdas de calor, para assim poder avaliar os fluxos térmicos no edifício. Para a análise do consumo da edificação, foram configurados os parâmetros OutputVariable para simulação com a temperatura operativa e de bulbo seco com reportagem por hora. As variáveis em questão foram configuradas no item Output Variable, conforme Quadro 1.

Foram realizadas sete simulações. As simulações foram analisadas com o resultado final do consumo de aquecimento, resfriamento e consumo total (kWh/m².ano) para cada configuração de cobertura vegetada com as diferentes espessuras. A análise do consumo total considera as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento e demais consumos da edificação (iluminação e equipamentos).

Resultados e discussão

Consumo de energia

Com os resultados das simulações no software *Energy Plus* foi possível observar que a cobertura vegetada de 50 cm de altura de substrato apresentou o menor consumo energético total (84,3 kWh/m².ano), seguido da cobertura de fibrocimento com isolamento de poliestireno extrudado (88,2 kWh/m².ano). A cobertura de fibrocimento com pintura branca apresentou menor consumo de resfriamento (6,4 kWh/m².ano), Figura 6. De acordo com as simulações baseadas na climatização artificial, a cobertura de fibrocimento branco apresentou maior consumo para aquecimento (28,1 kWh/m².ano), enquanto a de fibrocimento convencional apresentou maior consumo para resfriamento (24,9 kWh/m².ano). Com relação à análise do consumo de aquecimento, a cobertura vegetada de 50 cm obteve o menor valor, com 9,0 kWh/m².ano, seguida da cobertura de fibrocimento com isolamento, que apresentou 9,9 kWh/m².ano. Entre as coberturas de fibrocimento sem pintura, fibrocimento com pintura branca e fibrocimento com poliestireno extrudado, o menor consumo de resfriamento foi do fibrocimento com pintura branca e o menor consumo de aquecimento o do fibrocimento com isolamento, sendo o último o de menor consumo total. A cobertura vegetal de 25 cm de substrato obteve um consumo total de 89,1 kWh/m².ano, sendo muito próxima do valor do fibrocimento com isolamento.

Dentre as coberturas analisadas, a cobertura de fibrocimento apresentou o pior desempenho termoenergético, com consumo total de 103,5 kWh/m².ano. Tanto o consumo total da edificação quanto o consumo com o sistema de ar condicionado, observando o aquecimento e a refrigeração, são caracterizados na Tabela 5 e Figura 6.

Quadro 1 - Dados de saída do software Energy Plus para apuração dos fluxos térmicos

Variáveis de ganhos e perdas de calor	Output Variable
Sistema de iluminação	Zone Lights Total Heating Rate
Equipamentos	Zone Electric Equipment Total Heating Rate
Fluxo térmico através das esquadrias	- Zone Windows Total Heat Loss Rate - Zone Windows Total Heat Gain Rate
Infiltração de ar	- Zone Infiltration Total Heat Loss Energy - Zone Infiltration Total Heat Gain Energy
Ocupação (pessoas)	Zone People Total Heating Rate
Trocas de calor por condução através das superfícies opacas	Surface Average Face Conduction Heat Transfer Rate
Trocas de calor sensível e latente da vegetação	- Green Roof Vegetation Sensible Heat Transfer Rate per Area - Green Roof Vegetation Latent Heat Transfer Rate per Area
Trocas de calor sensível e latente do substrato	- Green Roof Soil Sensible Heat Transfer Rate per Area - Green Roof Soil Latent Heat Transfer Rate per Area

Fonte: autores

Tabela 5 - Dados referentes ao consumo da edificação

Sistema de cobertura	Aquecimento (kWh/m ² .ano)	Resfriamento (kWh/m ² .ano)	Consumo total (kWh/m ² .ano)
Cobertura vegetada_10cm	14,99	23,50	99,09
Cobertura vegetada_15cm	13,02	21,33	94,90
Cobertura vegetada_25cm	11,30	17,34	89,10
Cobertura vegetada_50cm	9,02	14,90	84,31
Fibrocimento branco	28,11	6,47	95,07
Fibrocimento	17,90	24,94	103,51
Fibrocimento com isolamento	9,91	17,86	88,22

Fonte: Autores

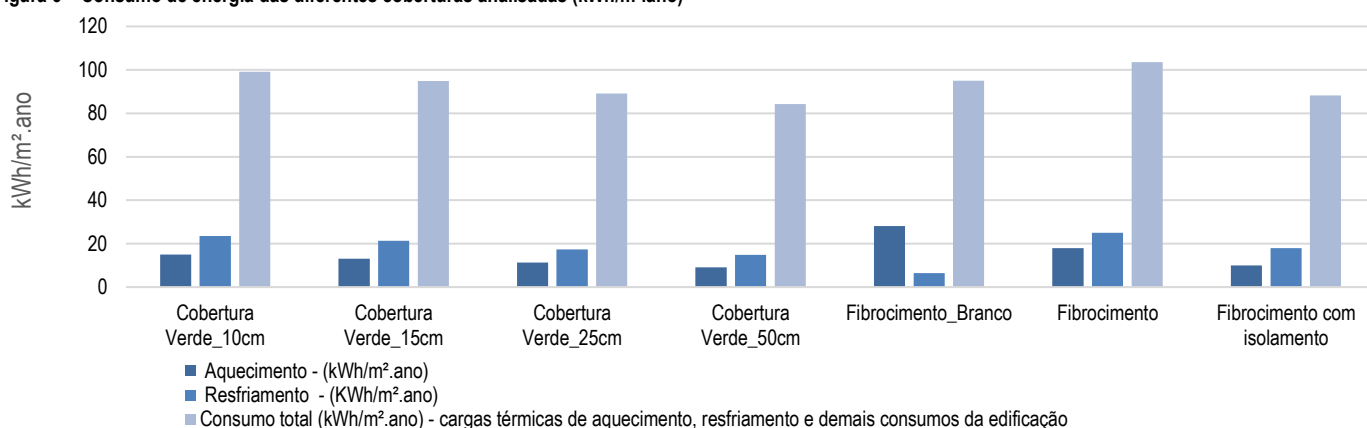
Balço térmico do edifício - Coberturas vegetadas com substrato de 10 cm e 50 cm

A partir da avaliação do fluxo de calor nas coberturas vegetais foi possível identificar, durante o dia de inverno analisado, que as coberturas de 10 cm e 50 cm de espessura de substrato obtiveram os maiores ganhos térmicos devido, principalmente, às trocas de calor provenientes das pessoas, seguidas das trocas por condução e radiação por meio das esquadrias, da iluminação e dos equipamentos eletroeletrônicos. No tocante às perdas de calor no mesmo período, as taxas de infiltração, a condução por meio das superfícies opacas e as trocas de calor sensível da vegetação e do substrato tiveram a maior contribuição nos resultados. (Figura 7).

Dentre estas duas coberturas vegetadas foi possível perceber que, durante o inverno, a cobertura vegetal de 50 cm de espessura de substrato apresentou o menor fluxo

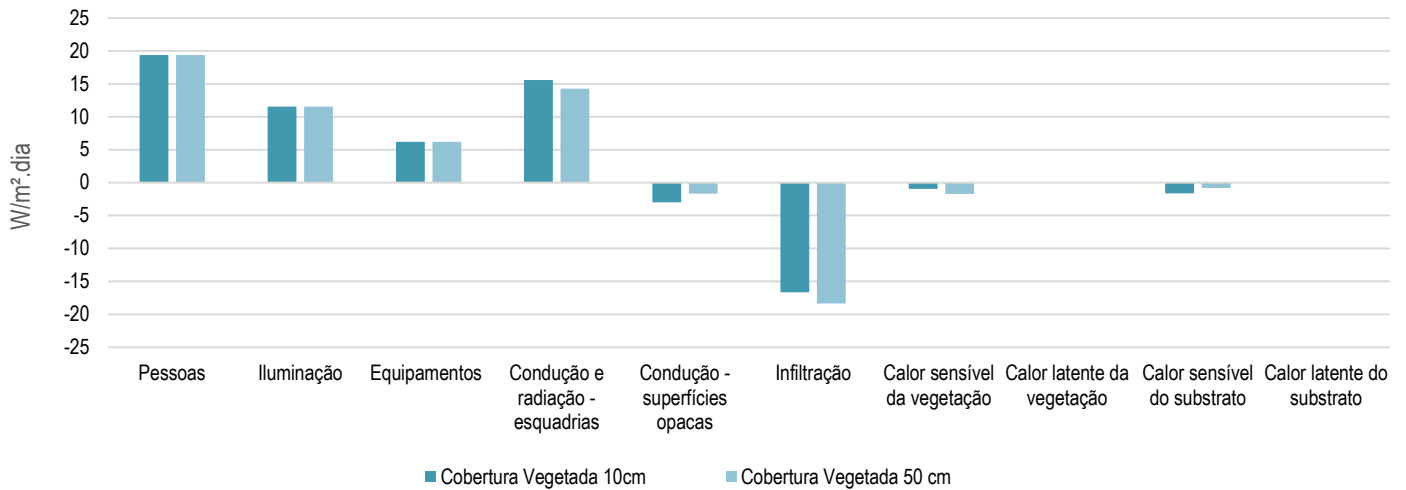
térmico e também se mostrou mais eficiente energeticamente, apresentando o menor consumo de energia para aquecimento. Isso se deu em função de seu maior isolamento térmico, contribuindo também com a maior inércia térmica da cobertura caracterizando, portanto, a principal diferença entre o desempenho das coberturas de 10 e 50 cm de substrato. Já a cobertura vegetal de 10 cm de espessura de substrato, em função da menor inércia térmica e menor nível de isolamento térmico, apresentou maior perda por condução das superfícies opacas, o que justifica sua maior necessidade de consumo para aquecimento, quando a mesma é comparada com a de maior espessura.

Em relação ao dia de verão estudado, se destacaram os ganhos adquiridos por meio da condução e da radiação solar através das esquadrias, seguidos das taxas de infiltração, das pessoas, iluminação, equipamentos e condução através das superfícies opacas. No que se refere às perdas, ganham relevância as trocas por calor sensível e calor latente da vegetação e do substrato. (Figura 8). A cobertura vegetal com maior espessura de substrato, quando comparada à de menor espessura, colaborou com o menor consumo para resfriamento da edificação ocasionado pela sua maior massa e inércia térmicas. Neste viés, a diferença de espessura do substrato e da camada vegetal contribuíram para que a cobertura vegetada com 50 cm de substrato apresentasse fluxo térmico menor, quando comparada às coberturas com espessura de substrato igual ou menor. Além disso, foi possível identificar que as perdas relacionadas às trocas de calor sensível da vegetação também fomentaram a redução no ganho de calor entre essas coberturas.

Figura 6 – Consumo de energia das diferentes coberturas analisadas (kWh/m².ano)

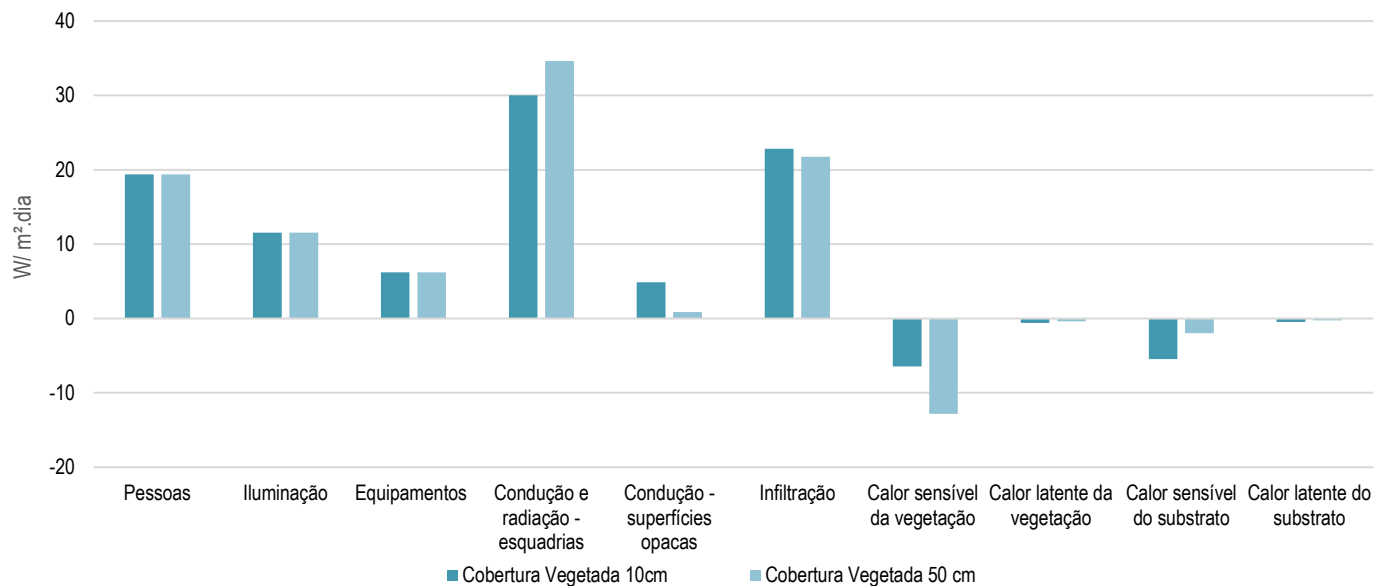
Fonte: Os autores

Figura 7 – Fluxo térmico total (W/m².dia)-Inverno, 05 de junho.



Fonte: Os autores

Figura 8 – Fluxo térmico total (W/m².dia)-Verão, 10 de janeiro.



Fonte: Os autores

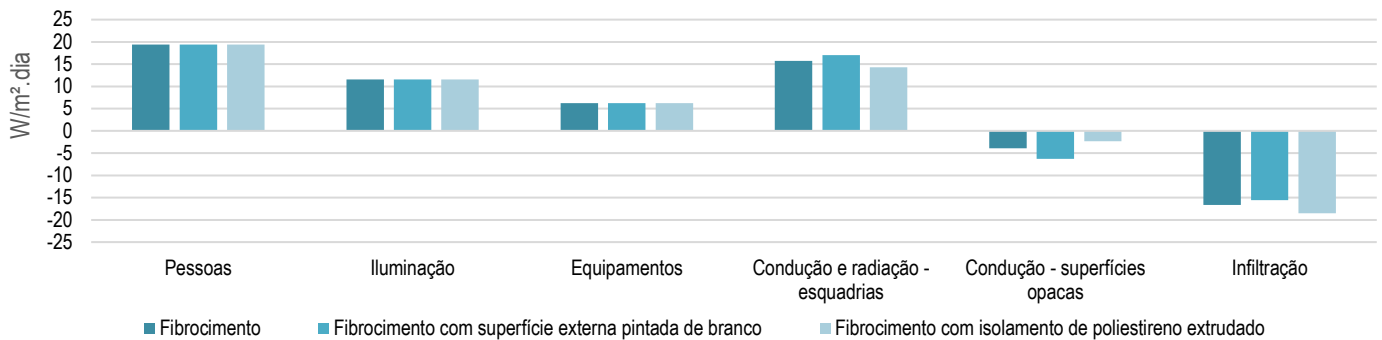
Balço térmico do edifício - Coberturas de fibrocimento

Em relação às perdas de calor da cobertura de fibrocimento, ganhou notoriedade a alta taxa de infiltração, seguida da condução por intermédio das superfícies opacas (Figura 9). No que diz respeito ao dia de verão, os principais fatores que contribuíram para o aumento da carga térmica foram a condução e a radiação através das esquadrias, a infiltração, seguidos das pessoas, da iluminação e da condução nas superfícies opacas. Com relação às perdas térmicas nesse período, a cobertura de

laje de concreto com telha de fibrocimento e pintura branca foi a única que apresentou menor ganho de calor por condução através das superfícies opacas, o que é justificado por sua alta refletância solar. (Figura 10)

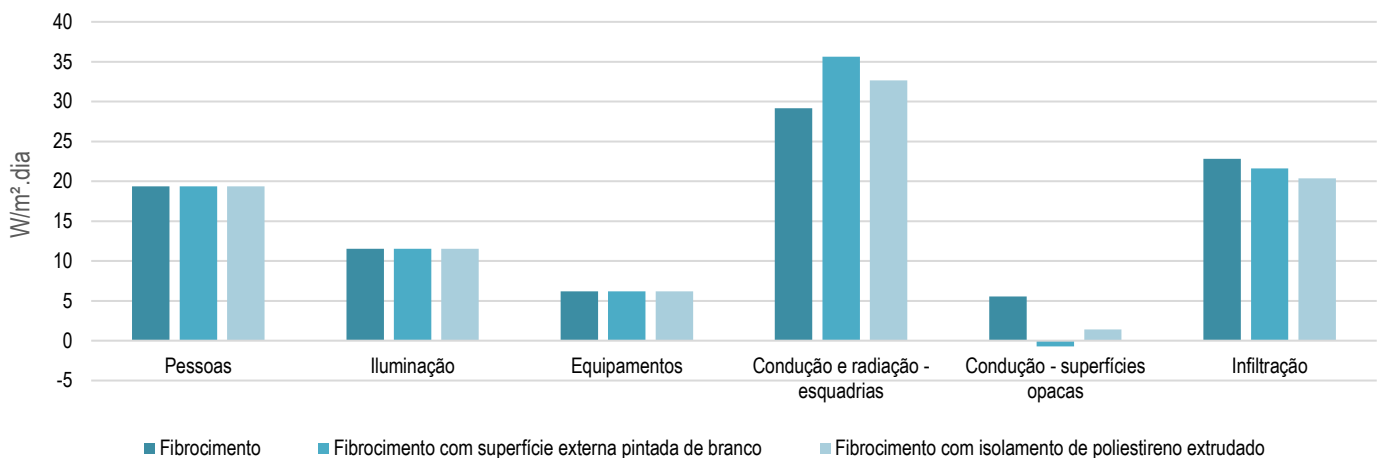
Dentre as coberturas de laje de concreto e telha de fibrocimento, a cobertura com isolamento térmico de poliestireno extrudado foi a que apresentou as menores perdas de calor, quando comparada às coberturas de fibrocimento sem pintura e pintada de branco. Esse fato deveu-se à baixa transmitância térmica da mesma.

Figura 9 – Fluxo térmico total (W/m².dia)-Inverno, 05 de junho. Coberturas de fibrocimento.



Fonte: Os autores

Figura 10 – Fluxo térmico total (W/m².dia)-Verão, 10 de janeiro. Coberturas de fibrocimento



Fonte: Os autores

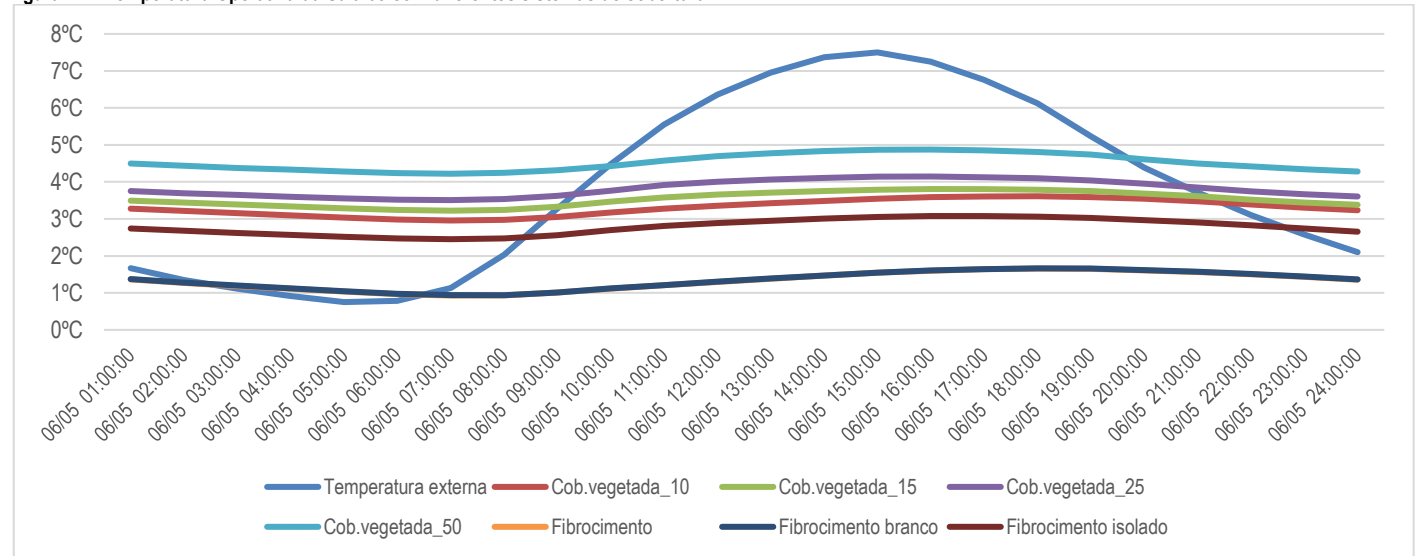
Análise comparativa dos diferentes tipos de cobertura avaliados

De acordo com a análise do balanço térmico no edifício de escritórios considerado, os principais ganhos térmicos em todos os tipos de cobertura avaliados, tanto no inverno quanto no verão, foram os ganhos de calor por ocupação, por condução e radiação através das esquadrias, pelo sistema de iluminação e dos equipamentos eletroeletrônicos. O tipo de cobertura utilizado apresentou importante influência nos resultados, o que de certa forma era esperado considerando que o edifício é térreo. Nas coberturas vegetadas, as trocas por calor sensível e latente da vegetação e do substrato contribuíram com as perdas térmicas nos dois dias de projeto analisados, sendo mais expressivas durante o verão. Um dos fatores que as diferenciou das demais coberturas avaliadas e que contribuiu com seus resultados foram os processos físicos envolvidos na sua constituição, como o fenômeno das trocas térmicas por meio da evapotranspiração das plantas,

decorrentes da umidade da vegetação e do seu substrato. Além disso, por se tratar de um tipo de cobertura com alta inércia térmica, permite que a temperatura interior da edificação seja mantida constante por mais tempo. Na Figura 11 observamos que a temperatura operativa da sala 05 tem a menor variação (0,65°C) quando presente a cobertura vegetada com 50 cm de substrato, a qual tem a maior capacidade térmica (882 kJ/m².K). Com a presença da cobertura vegetada com 50 cm de substrato, observa-se também que a sala 05 apresentou as maiores temperaturas internas no dia 05 de junho, cerca de 4,14°C a temperatura máxima.

Observou-se nos resultados que quanto maior a inércia térmica conjugada com o maior isolamento da cobertura, maior o aumento relativo de perdas e ganhos térmicos por condução das paredes externas e esquadrias. Ainda assim, em decorrência dos menores ganhos e perdas de calor pelo sistema de cobertura vegetada, verificou-se que a carga térmica de resfriamento das edificações com este

Figura 11 – Temperatura Operativa da Sala 05 com diferentes sistemas de cobertura



Fonte: Os autores

sistema é menor. Nesses casos de maior inércia térmica, o aumento da carga térmica de aquecimento é inferior à diminuição da carga térmica de resfriamento, fazendo com que o balanço final seja melhor para as coberturas com maiores capacidades térmicas e menores transmitâncias térmicas, respectivamente: coberturas vegetadas com substrato de 50 cm, 25 cm, 15 cm, 10 cm, fibrocimento com isolamento térmico de poliestireno extrudado, fibrocimento pintado de branco sobre a laje e fibrocimento sem pintura. Verificou-se também que, além alta capacidade térmica e baixa transmitância térmica das coberturas vegetadas, a evapotranspiração da vegetação auxilia na diminuição das cargas térmicas de resfriamento.

Conclusões

Este artigo procurou evidenciar os aspectos termoenergéticos das coberturas vegetadas, tendo como ponto de partida a redução do consumo de energia nas edificações. A análise detalhada de fluxos térmicos e da temperatura do ar interior da edificação evidenciou a evapotranspiração e a elevada capacidade térmica do plano horizontal como importantes variáveis que caracterizam o melhor desempenho da cobertura vegetada com 50 cm de substrato. Neste trabalho, foi realizada uma avaliação do consumo energético anual ($\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$) e do balanço térmico de uma edificação de escritórios artificialmente condicionada, localizada no clima subtropical úmido no sul do Brasil, considerando diferentes tipos de cobertura vegetal, com substrato de espessuras diversas comparadas a coberturas de laje de concreto armado e telha de fibrocimento, com opções com e sem pintura branca e com isolamento térmico.

As coberturas vegetadas simuladas ganham destaque em todas as situações quando comparadas com a cobertura de fibrocimento sem pintura. Comparada à cobertura de fibrocimento com isolamento de poliestireno extrudado, (consumo de $88,2 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{ano}$), a cobertura vegetal com 50 cm de substrato foi a mais vantajosa (consumo de $84,3 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{ano}$). A diferença de transmitância térmica entre os dois modelos é muito pequena ($0,04 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), por outro lado a diferença entre a capacidade térmica dos dois modelos é de 310%, proporcionando uma diferença entre os consumos de 4,4%. Evidencia-se, portanto, que a capacidade térmica da cobertura vegetada interferiu diretamente no aumento do desempenho da cobertura de 50 cm de substrato.

O bom desempenho termoenergético das coberturas vegetadas se deve às propriedades de evapotranspiração das plantas, através das trocas de calor latente que não ocorrem nas demais coberturas, além da contribuição do substrato como forma de isolamento e inércia térmica da edificação. Quanto à cobertura de laje com fibrocimento sem pintura, utilizada como caso base, esta apresentou resultados pouco favoráveis a um bom desempenho térmico na situação analisada. O incremento de um isolante térmico e da cor branca, nesse caso, aparecem como alternativas eficazes, por contribuírem com o aumento do desempenho do edifício.

Os benefícios das coberturas vegetadas não dizem respeito apenas ao aspecto energético, estas podem contribuir positivamente na transformação das cidades com um todo, inclusive na melhoria da percepção visual dos usuários.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Conforto e Eficiência Energética da Universidade Federal de Pelotas (LABCEE) pelo apoio durante a realização da pesquisa.

Referências

- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook** - Fundamentals. Atlanta, 2009.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo de transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**. Desempenho Térmico de Edificações- Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-1**. Instalações de ar-condicionado -Sistemas centrais e unitários Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro: ABNT, 2008a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-3**. Instalações de ar-condicionado — Sistemas centrais e unitários Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2008b.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) I. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p.198–212. 1998.
- BOAFO, F. E.; KIM, J.-T.; KIM, J.-H. Evaluating the impact of green roof evapotranspiration on annual building energy performance. **International journal of green energy**, v. 14. n. 5. p. 479-489, Jan. 2017. DOI:<https://doi.org/10.1080/15435075.2016.1278375>
- BRASIL, MINISTÉRIO DA SAÚDE. **PORTARIA Nº 3.523, DE 28 DE AGOSTO DE 1998**. Brasília, 1998.
- CIBSE, G. A- **Environmental Design**. Londres: CIBSE, 2007.
- COMA, J. PÉREZ, G., SOLÉ, C., CASTELL, A., CABEZA, L. F. Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings. **Renewable energy**, v. 85, p. 1106–1115. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.074>
- DIAS, A. E. **O desempenho térmico de uma cobertura verde em simulações computacionais em três cidades brasileiras**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- USDOE - US DEPARTMENT OF ENERGY. **Engineering Reference**. Version 8.5. Berkley. 2016.
- DUARTE, D. H. S. **O impacto da vegetação no microclima em cidades adensadas e seu papel na adaptação aos fenômenos de aquecimento urbano. Contribuições a uma abordagem interdisciplinar**. 2015. Tese (Livre – Docência) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- EMILSSON, T. Vegetation development on extensive vegetated green roofs: influence of substrate composition, establishment method and species mix. **Ecological engineering**, v. 33, n. 3–4, p. 265–277. Jul. 2008. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.05.005>
- FENG, H.; HEWAGE, K. Energy saving performance of green vegetation on Leed certified buildings. **Energy and buildings**, v. 75, p. 281–289. Jun. 2014. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.039>.
- JAFFAL, I.; OULDBOUKHITINE, S.-E.; BELARBI, R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. **Renewable energy**. v. 43, p. 157–164. 2012. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.004>.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*. v.15, 259-263. 2006. DOI:<http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.

KWOK, A.G.; GRONZIK, W.T. **Manual de Arquitetura Ecológica**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3º edição. São Paulo: ProLivros, 2014.

LANGSTON, C. Green roof evaluation: a holistic “long life, loose fit, low energy” approach. *Construction economics and building*. v. 15, n. 4, p. 76–94. 2015. Disponível em: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84947939851&partnerID=tZotx3y1>. DOI: <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v15i4.4617>.

LIZ, Débora Gracielle Stiegemeier de. **Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC. Florianópolis, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional - Relatório Síntese, ano base 2016**. Rio de Janeiro, junho de 2017, pg. 30.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária Ltda, 2002.

RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. In: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. São Carlos, SP, 2012.

SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and buildings*, v. 40, n. 8, p. 1466–1478. Jan. 2008. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.001>.

SCHARF, B.; ZLUWA, I. Case study investigation of the building physical properties of seven different green roof systems. *Energy and buildings*. v. 151, p. 564–573. Sep. 2017. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.050>

ⁱ **Tatiane Ballerini Fernandes**

Arquiteta e Urbanista. Graduação. Pesquisadora do Laboratório de Conforto e Eficiência Energética, FAUrb, UFPel. Endereço postal: Rua Benjamim Constant 1359, Centro, Pelotas, RS, Brasil, CEP: 96010-020

ⁱⁱ **Roseana Bonotto Ruivo**

Arquiteta e Urbanista. Graduação. Pesquisadora do Laboratório de Conforto e Eficiência Energética, FAUrb, UFPel.. Endereço postal: Rua Benjamim Constant 1359, Centro, Pelotas, RS, Brasil, CEP: 96010-020

ⁱⁱⁱ **Eduardo Grala da Cunha**

Arquiteto e Urbanista. Doutor pela UFRGS. Professor no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura (PROGRAU, FAUrb, UFPel). Endereço postal: Rua Benjamim Constant 1359, Centro, Pelotas, RS, Brasil, CEP: 96010-020

^{iv} **Lisandra Fachinello Krebs**

Arquiteta e Urbanista. Mestre. Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura (PROPAR, UFRGS) e Ph.D. Student at Lunds Tekniska Högskola, Universidade de Lund, Suécia. Endereço postal: Rua Benjamim Constant 1359, Centro, Pelotas, RS, Brasil, CEP: 96010-020