

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES TIPOLOGIAS DE COBERTURAS VEGETADAS DE UM NÚCLEO DE ESCRITÓRIOS LOCALIZADO EM PELOTAS-RS

Roseana Bonotto Ruivo (1); Tatiane Ballerini Fernandes (2); Lisandra Fachinello Krebs (3); Eduardo Grala da Cunha(4)

(1) Arquiteta e Urbanista, Aluna Especial do Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo-PROGRAU da Universidade Federal de Pelotas, roseanabonotto@hotmail.com

(2) Arquiteta e Urbanista, Aluna Especial do Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo-PROGRAU da Universidade Federal de Pelotas, tatifafe18@hotmail.com

(3) PhD Student at Department of Architecture and the Built Environment, Lund University, liskrebs@gmail.com

(4) Arquiteto e Urbanista, Doutor, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, UFPel UFPel, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo-PROGRAU. Rua Benjamin Constant, 1359 - Pelotas, Rio Grande do Sul-Brasil, Telefone: (53) 3284 55 11 | prograu@ufpel.edu.br

RESUMO

Este artigo apresenta o desempenho térmico de uma cobertura vegetada aplicada em um edifício de escritórios localizado na cidade de Pelotas-RS, Zona Bioclimática Brasileira 2. O edifício, que apresenta 212,5 m² e abrange seis zonas térmicas, foi modelado no software *Google SketchUp Make 15*, com o Plugin *Legacy Open Studio* versão 1.0.13 e simulado no software *Energy Plus 8.4.0* prevendo duas situações quanto à climatização: ventilação natural (para a apuração do conforto térmico) e condicionamento artificial (para a apuração da eficiência energética). Como alternativas à cobertura verde e parâmetros comparativos, foram utilizadas três situações de cobertura: convencional de fibrocimento com e sem isolamento térmico de poliestireno extrudado, e cobertura com superfície externa pintada de branco. O estudo buscou caracterizar o desempenho térmico das coberturas analisadas, através da avaliação dos resultados do conforto térmico e do consumo energético. Em todas as simulações, a cobertura verde com maior espessura de substrato (50 cm) apresentou melhor desempenho com 81,92% de conforto térmico anual e consumo energético de 15.809,32 kWh/ano, seguida da cobertura de fibrocimento com isolamento de poliestireno extrudado de 4 cm de espessura com resultados de 71,3% para conforto térmico anual e consumo de 16.541,76 kWh/ano. A cobertura de fibrocimento convencional foi responsável pelo maior gasto energético (19.409,44 kWh/ano) e o menor tempo de conforto térmico na edificação (53,22%). As coberturas vegetadas apresentaram melhores resultados de desempenho que as demais em função da capacidade de isolamento térmico e dos aspectos voltados a evapotranspiração e consequentes trocas de calor latente, não existentes nas demais.

Palavras-chave: Cobertura verde, eficiência energética, desempenho termoenergético, conforto térmico.

ABSTRACT

This paper presents the thermal performance of a roof vegetation applied to an office building located in the city of Pelotas, RS, Brazilian Bioclimatic Zone 2. The building, which has 212.5 m² and six thermal zones was modeled in the software *Google SketchUp Make 15* with the Plugin *Legacy Open Studio* version 1.0.13 and simulated with the software *Energy Plus 8.4.0* envisioning two climatic situations: natural ventilation (to verify the thermal comfort) and air conditioning system (to analyze the energy efficiency). As alternatives to roof vegetation and comparative parameters, a conventional fiber cement cover with and other without thermal insulation of extruded polystyrene were used as references, as well as with a white external surface painted. This study aimed to featuring the thermal performance of the roofs analyzed, to determine the most efficient through the evaluation of thermal comfort results and energy consumption. In all simulation the roof vegetation with higher substrate thickness (50cm) presented better thermo energetic performance with 81,92% annual thermal comfort and 15.809,32 kWh/year energy efficient, followed by the fiber cement

cover with extruded polystyrene insulation with 4cm thickness showing 71,3% annual comfort and 16.541,76 kWh/year consumption. As for the simulated roofs that presented the worst thermal performance, the conventional fiber cement cover was responsible for the greater energy expenditure (19.409,44 kWh/year) and the less comfort time in the building(53,22%). The green roofs presented better performance results than the others due to the thermal insulation capacity, evapotranspiration and the latent heat exchange aspects, which did not exist in the others.

Keywords: roof vegetation, energy efficient, thermo energetic performance, thermal comfort

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2016), no Brasil o consumo de energia elétrica nas edificações residenciais corresponde a aproximadamente 45% 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 obter 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. Segundo Mascaró (1992), os elementos determinantes do desempenho térmico das edificações são as paredes e a cobertura, denominadas envolventes. Desta forma, o bom desempenho térmico da habitação está diretamente relacionado aos materiais 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, alvo de estudos deste trabalho, desponta como uma eficiente aliada. De acordo com Vecchia (2005) ela pode auxiliar na melhoria do conforto térmico das edificações, através de suas características sustentáveis e benefícios como o aumento da área verde útil, controle do escoamento superficial e influência sobre a temperatura diminuindo a perda de calor do interior das edificações no inverno e reduzindo seu ganho no verão.

Para Jaffal et al. (2012) estudos têm demonstrado que mesmo considerando as temporadas quente e fria em climas diversos, as coberturas vegetadas, quando dotadas das configurações apropriadas, tendem a apresentar desempenho térmico satisfatório. Os autores 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) no período de um ano e compararam o desempenho de uma cobertura convencional bem isolada (com telhas sanduíche) com outra, de vegetação extensiva da espécie *Sedum*, sendo que a extensiva compreende uma vegetação com um substrato entre 10 e 15 cm de profundidade e abriga plantas pequenas e resistentes, como gramíneas. (CHING, 2010). Em seu estudo da cidade La Rochelle, foram avaliadas as temperaturas superficiais das folhas e do solo. Os autores contam que, no verão, a amplitude da temperatura superficial do telhado foi reduzida em 30°C no modelo vegetado. O fluxo de calor pelo telhado também foi avaliado: no verão, a cobertura vegetada demonstrou o efeito de resfriamento esperado e, no inverno, reduziu as perdas de calor nos dias frios. Foi observado pelos autores que, nos dias ensolarados, as perdas de calor pela cobertura vegetada foram maiores que o da cobertura convencional também no inverno. Contudo, 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 é reduzido.

No clima quente de Atenas a demanda diminuiu principalmente devido aos efeitos do sombreamento e evapotranspiração proporcionados pela vegetação. No caso do clima frio de Estocolmo, a redução de consumo se dá através do efeito de isolamento adicional proporcionado pela camada de substrato e a camada de ar subjacente à folhagem, apesar dos efeitos de evapotranspiração existirem. A evapotranspiração é limitada, permitindo assim que a camada de substrato atue como isolante. Neste caso as temperaturas do solo mantiveram-se até 5,6°C mais altas que a temperatura externa. A evapotranspiração é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, sendo um fenômeno de fundamental importância para a vida no planeta. Ela é responsável por quase todo o volume de água transferido dos continentes para a atmosfera, além de desempenhar um papel definitivo na liberação de calor latente, de acordo com Bastiaansen et al. (1998a). A

quantificação da evapotranspiração nas coberturas vegetadas possui relação direta com a espécie vegetal e 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 (PEREIRA *et al.*, 2002). O balanço energético de uma cobertura vegetal, diferentemente de uma cobertura convencional, apresenta o componente calor latente, conforme Figura 01. 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).

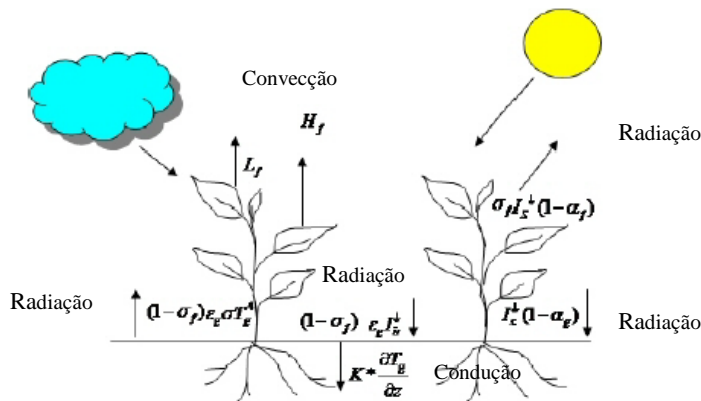


Figura 1 – Balanço energético de uma cobertura verde no Energy Plus
Fonte: USDOE (2015)

Dias (2016) realizou um estudo em que foi analisado o desempenho de uma cobertura vegetada a partir de simulações no *software EnergyPlus* em três cidades brasileiras, sendo elas, Curitiba-PR, Brasília-DF e Belém-PA. Como alternativas à cobertura vegetal foi utilizada uma cobertura convencional de fibrocimento e uma com superfície externa pintada de branco. Quando comparados os resultados da cobertura vegetada ao desempenho térmico da cobertura convencional, as reduções de cargas térmicas encontradas foram de 83% (102,1 kWh/m².ano), 89% (78,3 kWh/m².ano) e 95% (72,4 kWh/m².ano), para Belém, Curitiba e Brasília, respectivamente. Comparando-se o desempenho térmico da cobertura verde com a cobertura “fria”, obteve-se uma redução de cargas térmicas de 28% em Belém (5,6 kWh/m².ano), 90% em Curitiba (86,5 kWh/m².ano) e 91% em Brasília (40,3 kWh/m².ano). O balanço térmico e períodos específicos foram analisados para as três coberturas. A evapotranspiração mostrou-se como a parcela fundamental para o melhor desempenho térmico da cobertura verde em situações de demanda de resfriamento. Na ocasião de demanda de aquecimento, a camada de substrato atua limitando a retirada de calor do ambiente interno por condução. Com exceção de Brasília, em todas as cidades estudadas a adição de uma camada de isolamento foi suficiente para que os desempenhos térmicos das coberturas de fibrocimento superassem o da cobertura verde sem isolamento. A cobertura verde, conforme utilizada, mostrou-se uma forma de melhorar o desempenho térmico nos três climas simulados. Liz (2016) realizou um experimento em Florianópolis-SC, com a finalidade de identificar os elementos que compõem uma cobertura vegetal e que são capazes de contribuir com o processo de transferência de calor através da cobertura. Foram instaladas lajes de concreto que serviram de base para as diferentes configurações de coberturas vegetadas analisadas, as quais incluíram variação no teor de umidade, espessura do substrato, variação da camada vegetal e isolamento térmico. Os resultados identificaram que a variação da espessura do substrato e da camada vegetal apresentaram os dados mais significativos na redução do ganho de calor. A presença da vegetação e a maior espessura do substrato resultaram em um atraso térmico de 5,95h e 4,77h, respectivamente, já o amortecimento térmico para os mesmos casos foi de 42% e 43%.

Para a simulação do desempenho térmico da cobertura na edificação analisada, foi escolhido o *software Energy Plus*. Essa ferramenta, desenvolvida pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, permite quantificar o consumo de energia, através de simulações dos sistemas de aquecimento, iluminação e ventilação do edifício. Neste trabalho, será apresentado um estudo comparativo do desempenho

termoenergético de sete configurações de coberturas, quatro vegetadas com diferentes alturas de substratos e plantas e três com fibrocimento.

2. OBJETIVO

Este estudo busca por intermédio de uma análise comparativa, caracterizar o desempenho termoenergético de sete diferentes configurações de coberturas. A comparação do uso da cobertura vegetal com espessuras diferentes de substratos às coberturas de fibrocimento com e sem isolamento e com pintura branca, busca confrontar as características e comportamento de cada uma, de maneira a determinar qual é mais eficiente. Para tanto, foi realizada uma análise do consumo (kWh) e também do conforto térmico da edificação, considerando a Zona Bioclimática Brasileira 2.

3. MÉTODO

A estratégia metodológica empregada neste estudo foi a simulação computacional. Para atender ao objetivo foi realizada uma análise comparativa entre diferentes soluções de cobertura, sendo elas:

- 1) coberturas verdes; 2) cobertura de fibrocimento; 3) cobertura de fibrocimento com pintura branca; e 4) cobertura de fibrocimento com isolamento de poliestireno extrudado.

Para a obtenção dos resultados de conforto térmico e consumo energético dos modelos, os mesmos foram configurados e simulados primeiramente com ventilação natural, e posteriormente, com condicionamento artificial.

3.1. Definição da Zona Bioclimática

A cidade de Pelotas está situada na Zona Bioclimática Brasileira 2 (Latitude: 31°46'19" S, Longitude: 52°20'33" W), mas como ainda não possui arquivo climático utilizou-se o arquivo disponível para a zona da cidade de Camaquã - Rio Grande do Sul (Latitude: 30°51'04" S, Longitude: 51°48'44" W) localizada na mesma Zona, NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

Foi utilizado o arquivo climático elaborado por Maurício Roriz (ANTAC – GT Conforto e Energia) mediante dados registrados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) no período de 2001 a 2010.

3.2. Definição das Zonas Térmicas

O edifício foi modelado com seis zonas térmicas, sendo todas salas de escritórios de medidas 5,00 x 5,00m, totalizando 25,00 m² e pé-direito de 3,50m. A Figura 2 corresponde ao modelo tridimensional do *Google SketchUp* e a Figura 3 mostra a planta esquemática do modelo, com suas dimensões. Para simplificar a entrada de dados, o modelo inicial foi construído com todas as coberturas horizontais, posteriormente configuradas no *Energy Plus*. Com a finalidade de isolar a influência das trocas 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 (CIBSE, 2007).

3.3 Definição dos Dias Típicos

A avaliação do desempenho térmico da NBR 15575-1 (ABNT, 2013) é separada em situações de verão e inverno, definidas por um dia típico de projeto, conforme exigido pela norma. De acordo com Siqueira et. al (2005) o dia típico de projeto é definido como um dia real, caracterizado pela velocidade média predominante do vento e pelos valores horários de cada uma das seguintes variáveis: temperatura e umidade relativa do ar e radiação solar incidente em superfície horizontal. A obtenção dos dias típicos de projeto é feita por meio de uma estatística dos valores das médias, máximas e mínimas diárias dos parâmetros climáticos locais. Para a simulação em questão, foram utilizados os dias típicos 5 de junho para inverno e 10 de janeiro para verão.

3.4. Configuração do Sistema de Iluminação

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 8:00h às 12:00h e das 13:30h às 18:00h. Aos sábados, o funcionamento do edifício ocorre das 8:00h às 12:00h. Como fração radiante da iluminação foi utilizado o valor de 0,42, conforme *Input/Output Reference* (*Energy Plus*, 2016).

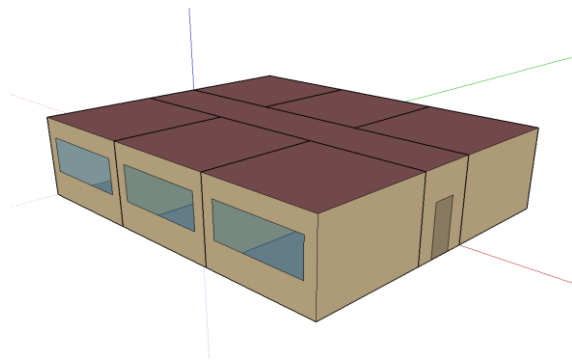


Figura 2 – Perspectiva do modelo de Simulação- Sketch Up e Plugin Legacy OpenStudio

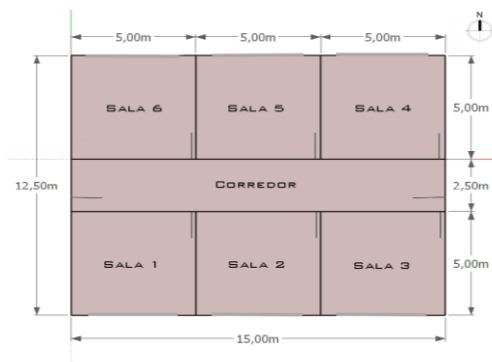


Figura 3 – Planta baixa do modelo de Simulação.

3.5. Configuração da ocupação

Para a configuração da ocupação do edifício utilizou-se como base a NBR 16401- Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários, (ABNT, 2008), contando a densidade de ocupação alta com 1 posto de trabalho a cada $7,7 \text{ m}^2$ e $0,14 \text{ pessoas/ m}^2$, com 0,5 para a fração radiante. Com relação aos ganhos de calor interno da edificação, tendo em vista que no período considerado, a edificação é ocupada por usuários e há o uso de lâmpadas, em todas as simulações se incluiu ganhos de calor pela iluminação e por pessoas.

3.6. Configuração dos equipamentos

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, em que os equipamentos permanecem ligados no horário de funcionamento que ocorre das 8:00h às 12:00h e das 13:30h às 18:00h. Aos sábados, o funcionamento ocorre das 8:00h às 12:00h. Para todas as simulações foi adotado o valor 0,25 para a fração radiante de ganho de calor pelos equipamentos, consequentemente resultando em 0,75 para a fração convectiva (ASHRAE, 2009). Com base na ocupação alta pela NBR 16401, a cada $7,7 \text{ m}^2$ existe uma estação de trabalho com *desktop*. Sendo assim, o valor de $21,5 \text{ W/m}^2$ foi usado como base para a configuração dos equipamentos.

3.7. Configuração das paredes externas

As paredes externas foram configuradas com argamassa de 2,5 cm de espessura, lâ de vidro 2,5 cm, tijolo furado com 3,5cm de cerâmica de cada lado externo à camada de ar que possui $0,14 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ de resistência térmica, argamassa de 2,5 cm. Com a presença da lâ de vidro, as paredes externas se tornam bem isoladas, possibilitando uma maior análise da influência da cobertura no conforto térmico e no consumo de eletricidade para climatização (kWh). As propriedades térmicas da maior parte dos materiais usados, tais como condutividade térmica, densidade, calor específico, absorvância para radiação solar e resistência térmica, foram obtidas na norma NBR 15220 (ABNT, 2005a; 2005b). Estes dados são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

3.8. Configuração do Sistema de Ventilação e Climatização Artificial

3.8.1. Configuração do Sistema de Ventilação Natural Multizonas

Foi configurado no *EnergyPlus* o objeto *AirflowNetwork*, o qual permite que seja simulada a ventilação natural em multizonas com várias aberturas. Foi configurada a abertura de janelas em série, quando atingidos os 25°C em todas as salas de escritórios, sendo que se a diferença entre a temperatura interior e exterior for mais de 5°C , então as janelas se fecham. Cabe-se ressaltar que as janelas são abertas quando a temperatura exterior for inferior à temperatura interna em até 5°C . No *Output Variable*, foi utilizada a Temperatura média do ar, Temperatura de bulbo seco e Temperatura operativa como variáveis de saída, para que fosse possível analisar o conforto térmico acordando com o conforto adaptativo da norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2009).

3.8.2 Configuração do Sistema do Sistema de Ar Condicionado

Foi configurado um sistema de expansão direta (Split) com coeficiente de performance de 3,24 W/W. 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. Como dias típicos, foram utilizados os dias 5 de junho para inverno e 10 de janeiro para verão. No *HVACTemplate*, o termostato ficou com *Setpoint* de aquecimento de 21°C e *Setpoint* de resfriamento de 25 °C em todas as zonas térmicas com funcionamento automático, acordando com a NBR 16401 (ABNT, 2008).

3.9. Configuração das Coberturas

3.9.1. Configuração das Coberturas Verdes

As coberturas verdes 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 no aumento do conforto com base ambiental e redução do consumo energético da edificação. A classe de objetos de entrada disponível no programa no setor *Material:RoofVegetation* permite diversas opções de *design* de coberturas verdes, 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 o índice de área de foliar, as quais nos baseamos no modelo de DIAS, 2016. Nos dias quentes, a vegetação funciona como um sistema de resfriamento evaporativo natural. A maior quantidade de radiação absorvida é dissipada sob forma de calor latente e não sensível. 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, esse 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.

À medida que a planta vai crescendo aumenta o número de CO₂, estimulando cada vez mais a evapotranspiração. (Duarte, 2015). O efeito da evapotranspiração é analisado com base nos dados de entrada necessários, para considerar a influência na temperatura interna das edificações, sendo necessários os dados da 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. Segundo CHING (2010) as coberturas verdes de 10 e 15 cm são extensivas, sendo que na simulação a cobertura verde de 10 cm foi configurada com índice de área foliar de 0,5 e altura das plantas também de 10cm. O modelo simulado com espessura de 15cm de substrato, possui índice de área foliar igual a 1 e altura das plantas de 20cm. A cobertura verde de 25cm se enquadra na tipologia de semi-intensiva com altura das plantas de 50cm e índice 2 de área foliar. A última tipologia de 50 cm compreende uma cobertura verde extensiva, com altura das plantas de 1m e índice 5 de área foliar (Tabela 2). Estes valores foram baseados no *EnergyPlus Engineering Reference* e na dissertação de mestrado de DIAS (2016).

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]	Absortância Térmica	Absortância Solar
Argamassa de assentamento	0,025	1,15	2000	1000	-	-
Cerâmica	0,035	1	1600	920	-	-
Concreto	0,1	1,75	2200	1000	-	-
Lã de Vidro	0,1	0,025	50	700	0,90	0,50
Madeira	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 pintado de Branco	0,008	0,95	2000	840	0,85	0,20
Tijolo Maciço	0,11	1	1600	920	-	-

Tabela 2– Características dos materiais utilizados na simulação computacional para Cobertura Verde. DIAS, 2016

Material Cobertura Vegetada	Cobertura Vegetada (10cm)	Cobertura Vegetada (15cm)	Cobertura Vegetada (25cm)	Cobertura Vegetada (50cm)
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)	0,1	0,15	0,25	0,5
Condutividade no Solo Seco (W/mK)	0,35	0,35	0,35	0,35
Densidade do Solo Seco (kg/m ³)	1100	1100	1100	1100

3.9.2. Configuração da Cobertura de Fibrocimento

A cobertura de fibrocimento foi configurada com laje maciça de concreto armado de 10 cm de espessura, camada de ar com resistência térmica de 0,21 m².K/W e fibrocimento de 8mm com 0,85 de absorvância térmica, e 0,75 de absorvância solar. Além do fibrocimento tradicional, 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 em cima da laje de concreto armado, com a utilização do poliestireno extrudado de 4 cm com resistência térmica de 0,57 m².K/W.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

As simulações com as diferentes configurações de coberturas foram analisadas de duas maneiras, tanto com relação ao consumo (kWh), como também considerando o edifício ventilado naturalmente.

4.1. Edifício ventilado naturalmente

Foram feitas sete simulações com as configurações para ventilação natural, com o uso do sistema de abertura de janelas quando a temperatura interna for superior a 25°C. As coberturas verdes de 10, 15, 25 e 50 cm de espessura de substrato, apresentaram um nível de conforto térmico entre 58,38% e 81,92%, sendo que o aumento do conforto térmico ocorreu na medida em que foi aumentada a espessura do substrato. As coberturas de fibrocimento, fibrocimento com pintura branca, e fibrocimento com 4cm de poliestireno extrudado, obtiveram um nível de conforto térmico de 53,22%, 59,11% e 71,30%, respectivamente, sendo que as coberturas de fibrocimento convencional e fibrocimento com pintura na cor branca tiveram uma diferença de conforto de 5,89%. (Ver Gráfico 1) Avaliadas as diferenças de espessuras de substratos entre as coberturas verdes, foi verificada uma diferença de 23,54% entre a cobertura com 50 cm de substrato e 10 cm, sendo que a de 50cm apresentou o maior nível de conforto térmico (81,92%). Foi constatada uma porcentagem de conforto térmico muito semelhante entre a cobertura de fibrocimento com pintura branca (59,11%) e a cobertura verde de 10 cm de substrato (58,38%), sendo que o fibrocimento branco apresentou maior desconforto para frio com 39,32% e a cobertura verde 27,62%. Com relação às horas de desconforto por calor, a última obteve maior valor, com 14% e o fibrocimento com pintura branca 1,57 %, revelando um melhor comportamento da cobertura verde para o inverno e melhor comportamento do fibrocimento com pintura branca para o verão da cidade de Pelotas, com menor absorvância solar que a cobertura verde. Quando comparadas as coberturas verde e de fibrocimento com isolamento de poliestireno extrudado 4 cm, a primeira, com maior espessura de substrato apresenta melhor desempenho com 81,92% de conforto, e a segunda, 71,30% de conforto. Em relação a cobertura verde de menor espessura de substrato analisada (10cm), e o fibrocimento com isolamento, o último apresenta melhor resultado, com uma diferença de 12,92% de conforto. Essa diferença vai reduzindo conforme é aumentada a espessura do substrato da cobertura verde sem isolamento. Em relação às exigências humanas de conforto adaptativo em uma edificação, as normas ASHRAE 55:2009 considera como base 80% de satisfação dos usuários com as condições ambientais internas de conforto, limite este também aceito no Brasil.

4.2. Edifício climatizado artificialmente

Foram realizadas sete simulações com as configurações para sistema de climatização por ar condicionado com temperatura de operação fixada entre 21 e 25°C. As coberturas analisadas foram as verdes com substratos de 10, 15, 25 e 50 cm, cobertura de fibrocimento, fibrocimento com pintura branca e fibrocimento com 4 cm de poliestireno extrudado, respectivamente. As simulações foram analisadas com o resultado final do consumo de aquecimento e resfriamento e consumo total (kWh) para cada configuração de cobertura verde com as diferentes espessuras. A cobertura verde de 50cm de altura de substrato apresentou o menor consumo energético total (15.809,32 kWh.ano), seguido da cobertura de fibrocimento com isolamento de poliestireno extrudado (16.541,76 kWh.ano). A cobertura de fibrocimento com pintura branca apresentou menor consumo de resfriamento (1.213,83 kWh.ano) em comparação à cobertura verde de 50 cm de substrato (2.794,22 kWh.ano) (Ver Gráfico 2). De acordo com as simulações baseadas na climatização artificial, a cobertura de fibrocimento branco apresentou maior consumo para aquecimento (5.270,68 kWh.ano), enquanto a de fibrocimento convencional apresentou maior consumo para resfriamento (4.677,61 kWh.ano). Com a análise do consumo de aquecimento, a cobertura verde de 50 cm obteve o menor valor com 1.693,07 kWh.ano, seguida da cobertura de fibrocimento com isolamento que apresentou 1.858,82 kWh.ano. Entre as coberturas de fibrocimento, 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 fibrocimento com isolamento, sendo o último o de menor consumo total. A cobertura verde de 25 cm de substrato obteve um consumo total de 16.707,23 kWh.ano, sendo muito próxima do valor do fibrocimento com isolamento. Com relação a uma pré-existência de fibrocimento, neste caso torna-se mais viável a aplicação do isolamento térmico do que a alteração para uma cobertura verde, considerando a instalação e custo de implantação.

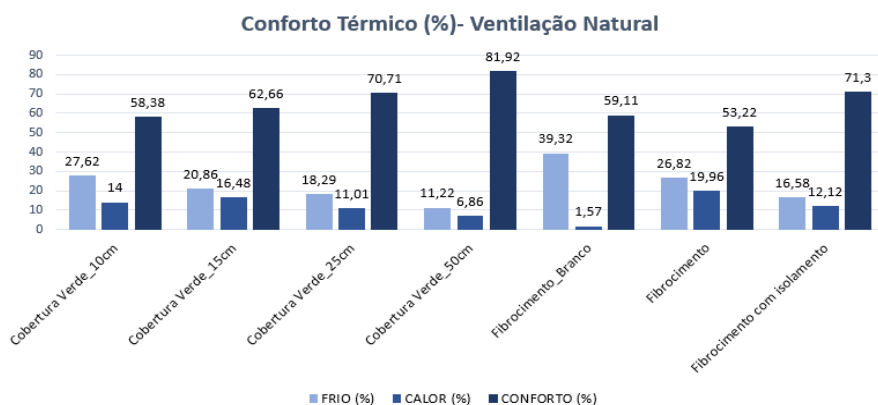


Gráfico 1 – Comparação dos Resultados da Ventilação Natural- Horas de Conforto Térmico x Tipos de coberturas

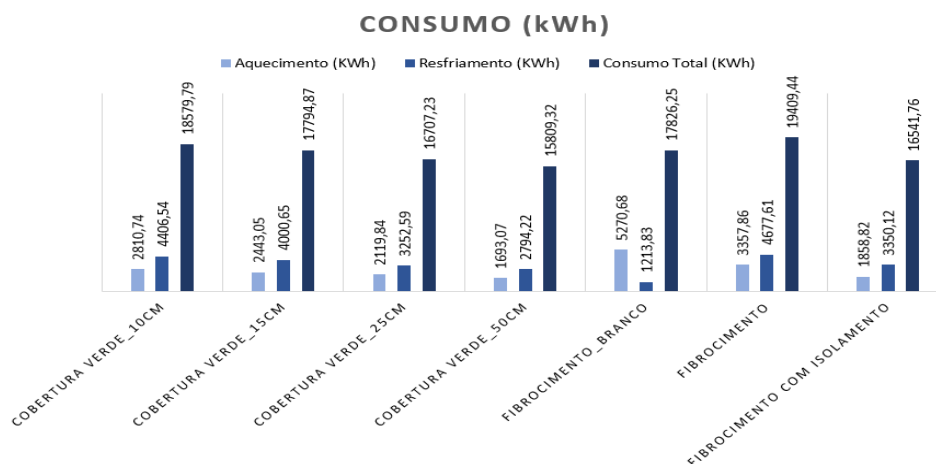


Gráfico 2 – Comparação dos resultados da climatização artificial para os diferentes tipos de coberturas

5. CONCLUSÕES

Nas simulações configuradas com o edifício ventilado naturalmente verificou-se que, quando comparadas as coberturas verde e de fibrocimento convencional, a primeira apresentou melhores resultados de conforto térmico em todas as situações simuladas, sendo mais vantajosa mesmo com reduzida espessura de substrato. Com relação às coberturas verdes, assim como no estudo de Lis (2016), os resultados apresentaram dados mais significativos na redução do ganho de calor com a variação da espessura do substrato e da camada vegetal, sendo as coberturas de maior espessura, as mais eficientes nos dois estudos. Quando a cobertura vegetada é comparada com a cobertura de fibrocimento com acréscimo 4 cm de isolamento de poliestireno extrudado, apenas a cobertura vegetal simulada com maior espessura de substrato se mostrou vantajosa (50 cm). Nesse caso, a utilização de um isolante térmico mostrou-se uma alternativa benéfica, apresentando resultados superiores às coberturas com menores alturas de substrato (10 e 15 cm) e dados muito semelhantes a cobertura verde configurada com 25cm de substrato. Enquanto isso, a cobertura com superfície externa pintada de branco mostrou ser uma alternativa viável para a zona bioclimática analisada, possuindo melhor resultado que a cobertura verde com altura de substrato de 10 cm e a cobertura de fibrocimento tradicional.

De acordo com as configurações realizadas através do condicionamento artificial as coberturas verdes simuladas ganham destaque em todas as situações quando comparadas com a cobertura de fibrocimento tradicional. Em relação ao fibrocimento com isolamento de poliestireno extrudado a cobertura verde com maior altura de substrato permanece mais vantajosa, entretanto a presença do isolante contribui para um decréscimo no consumo de energia, apresentando um consumo menor das coberturas verdes de 10, 15 e 25 cm. Já a cobertura com pintura branca, é positiva quando comparada à cobertura verde com menor espessura de substrato.

Nas situações configuradas com a edificação climatizada de formas natural e artificial, a utilização da cobertura verde se mostrou a mais vantajosa, tanto na apuração do conforto térmico quanto da eficiência energética. Estas melhorias no desempenho termoenergético se devem possivelmente às propriedades de evapotranspiração das plantas, através das trocas de calor latente que não ocorrem nas demais coberturas, assim como, a contribuição do substrato como forma de isolamento e inércia térmica da edificação, o que também é comprovado no estudo de Dias, 2016 com resultados significativos para as três cidades brasileiras (Curitiba-PR, Brasília-DF e Belém-PA) em diferentes zonas bioclimáticas. Quanto à cobertura de fibrocimento convencional, utilizada como referência, esta apresentou resultados pouco favoráveis a um bom desempenho térmico na situação analisada. O incremento de um isolante térmico ou da cor branca, nesse caso, aparece como uma alternativa eficaz por contribuir com o aumento do desempenho do edifício.

Este artigo procurou evidenciar os aspectos termoenergéticos das coberturas verdes, tendo como ponto de partida a redução do consumo de energia e o aumento do conforto ambiental nas edificações. Assim, foi possível concluir que as coberturas verdes apresentam potencial significativo de melhora no desempenho dos edifícios, apresentando resultados superiores mesmo quando comparadas à cobertura simulada com isolamento. Além disso, os benefícios das coberturas vegetadas não dizem respeito apenas ao aspecto energético, essas podem contribuir positivamente na transformação das cidades com um todo, inclusive na melhora da percepção visual dos usuários. Sugere-se para estudos futuros, além de comparar as coberturas verdes a outros modelos de coberturas, confrontar os resultados das simulações nas demais zonas bioclimáticas brasileiras e aprofundar a análise do balanço térmico do edifício compreendendo melhor o desempenho da cobertura neste contexto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.
- _____. **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.

_____. **NBR 15575-1:** Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos- Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 16401-1:** Instalações de ar-condicionado -Sistemas centrais e unitários Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 16401-3:** Instalações de ar-condicionado — Sistemas centrais e unitários Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **ASHRAE Handbook – Fundamentals.** Atlanta, 2009.

_____. **ASHRAE Standard 55.** Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy Atlanta, 2009

BASTIAANSSEN, 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. 1998a

CIBSE, **Guide A- Environmental Design.** Londres: CIBSE,2007

CHING, F. D. K. **Técnicas de construção ilustradas.** Porto Alegre: Bookman, 2010. 478 p.

DIAS, ADRIANO ETHUR. **O desempenho térmico de uma cobertura verde em simulações computacionais em três cidades brasileiras.** Setembro, 2016.

US DEPARTMENT OF ENERGY – DOE. **Engineering Reference.** Version 8.5. Berkley. 2016.

DUARTE, Denise Helena Silva. **O impacto da vegetação no microclima em cidades adensadas e seu papel na adaptação aos fenômenos de aquecimento urbano. Contribuições a uma abordagem interdisciplinar.** São Paulo, 2015.

INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos.** INMETRO, 2010

JAFFAL, I.; OULDBOUKHITINE, S.-E.; BELARBI, R. **A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance.** *Renewable energy*, 2012. v. 43, p. 157–164.

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

LIZ, Débora Gracielle Stiegemeier de.. **Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis.** Santa Catarina, 2016

MASCARÓ, Juan Luis. **Sustentabilidade em Urbanizações de Pequeno Porte.** Porto Alegre: Masquatro Editora.2010.

MASCARÓ, J. L.; MASCARÓ, L. E. R.; STORCHI, C.; CAMARGO, E. G.; MACIEL, Â.; GUTERRES, H. E.; BRENTANO, A. K.; FRANARIN, A. C. **Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios.** Rio Grande do Sul: 1992, 134 p

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional - Relatório Síntese, ano base 2015.** Rio de Janeiro, junho de 2016, pg. 30.

MIZGIER, Martin Ordenes. **Etiquetagem de Eficiência Energética em Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Apresentação.** Curso Eletrobrás. Rio de Janeiro: Outubro de 2011.

NARANJO, A.; MARINOSKI, D. L.; BATISTA, J. O.; CARLO, J. C.; ABREU, A. L. P.; GHISI, E. LAMBERTS, R. 6. ed. **Desempenho térmico das edificações.** Florianópolis, 2011. 196 p.

OLIVEIRA, Patrícia Lima de; SOARES, Raquel G; SANTOS, Sílvio Xavier. **Desempenho Térmico das Edificações: Estudo Comparativo entre o Telhado Verde e Outros Tipos de Coberturas.** *Revista Petra*, Vol.2, jan./jul. de 2016.

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

SIQUEIRA, Túlio César Pessotto Alves, AKUTSU, Maria, LOPES, Jarbas Ibraim Esperedião, SOUZA, Henor Artur de. **“Dados Climáticos para Avaliação de Desempenho Térmico de Edificações”.** *Rev. Esc. Minas* vol.58 n°2, Ouro Preto, Abril-Junho 2005.

SILVA, N. D. C. **Telhado Verde: Sistema Construtivo de Maior Eficiência e Menos Impacto Ambiental.** Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2011. J. O.; CARLO, J. C.; ABREU, A. L. P.; GHISI, E. LAMBERTS, R. 6. ed. **Desempenho térmico das edificações.** Florianópolis, 2011. p. 196

VECCHIA, F. **Cobertura verde leve (CVL): ensaio experimental.** In: VI Encontro nacional de conforto no ambiente construído (ENCAC) e IV Encontro latino americano sobre conforto no ambiente construído (ELACAC), 6. 2005. Maceió. Anais... Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2005. CD.