DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS VERDES COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES EM FLORIANÓPOLIS – SC

Taylana Piccinini Scolaro (1); Enedir Ghisi (2)
(1) Doutoranda, Engenheira Civil, taylanaps@hotmail.com
(2) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, enedir.ghisi@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Cx Postal 476, Florianópolis – SC, 88040-970, Tel.: (48) 3721 5184

RESUMO
As coberturas verdes são estruturas que permitem melhorar o desempenho térmico edificações, reduzindo o consumo de energia utilizada por sistemas mecânicos de condicionamento térmico. Em regiões tropicais, que são expostas à intensa radiação solar e onde é significativa a demanda de energia por resfriamento, a redução do ganho térmico através da cobertura é particularmente importante. Assim, este trabalho teve como objetivo comparar o desempenho térmico de coberturas verdes com diferentes espessuras do substrato, índices de área foliar e condições de irrigação, sujeitas às condições climáticas de Florianópolis – SC. Foram realizadas simulações computacionais de coberturas verdes ao longo de um ano, por meio do programa computacional EnergyPlus 9.3. Os resultados mostraram que o aumento da espessura do substrato protegeu a face interna da laje de cobertura de grandes variações de temperatura, enquanto o aumento do índice de área foliar, apesar de ter contribuído com a redução das temperaturas superficiais durante os meses mais quentes, também reduziu as temperaturas durante os meses mais frios. A irrigação da cobertura verde somente no período mais quente reduziu as temperaturas superficiais nos meses mais quentes, bem como elevou as temperaturas nos meses mais frios. Quanto às cargas térmicas ideais, houve redução de 46,2% nos valores com o aumento da espessura do substrato, de 74,7% com o aumento do índice de área foliar e de 65,0% com irrigação da cobertura somente no período mais quente. Concluiu-se que a escolha das características de projeto e a análise de irrigação de coberturas verdes influenciam consideravelmente o desempenho térmico das edificações.

Palavras-chave: cobertura verde, desempenho térmico, simulação computacional.

ABSTRACT
Green roofs are systems that can improve the thermal performance of buildings, reducing the energy consumption of air-conditioning systems. In tropical regions, which are exposed to high solar radiation and where cooling energy demand is significant, reducing heat gains through the roof is particularly important. Thus, this work aimed to compare the thermal performance of green roofs with different substrate thicknesses, leaf area indexes and irrigation conditions, under the climatic conditions of Florianópolis – SC. Computational simulations of green roofs were carried out over a year, using the EnergyPlus 9.3 computer programme. The results showed that the increase in the substrate thickness protected the internal surface of the slab from great temperature variations, while the increase in the leaf area index, despite having contributed to the reduction of surface temperatures during the warmer months, also reduced the temperatures during the coldest months. Irrigation of green roofs only in the warmest period reduced surface temperatures in the warmer months, and also increased temperatures in the coldest months. The ideal thermal loads decreased 46.2% when the substrate thickness increased, 74.7% when the leaf area index increased and 65.0% when there is roof irrigation only in the warmest period. It was concluded that choosing the project characteristics and analysing the green roof irrigation considerably influence the thermal performance of buildings.

Keywords: green roof, thermal performance, computational simulation.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as coberturas verdes têm recebido atenção considerável por contribuírem com a mitigação dos impactos ocasionados pela urbanização e pela mudança do clima. Estas coberturas fornecem diversos benefícios ecológicos para a saúde ambiental urbana, como melhoria do conforto térmico e da eficiência energética em edificações (JAFFAL *et al*., 2012), redução do escoamento superficial de água da chuva (YAO *et al*., 2020) e redução de ruído (VAN RENTERGHEM; BOTTELDOOREN, 2009).

O desempenho térmico das coberturas verdes é associado a processos físicos como evapotranspiração e sombreamento (SAILOR, 2008). A vegetação absorve parte do calor emitido pela radiação incidente e o libera através de processos de evapotranspiração decorrentes da fotossíntese, além de proporcionar sombreamento à cobertura. A camada de substrato contribui com a inércia térmica da cobertura e também está sujeita à evaporação (SAADATIAN *et al*., 2013). De acordo com Matheus *et al.* (2016), a utilização de coberturas vegetadas representa uma alternativa viável para controle térmico passivo de temperaturas elevadas no interior das edificações.

Segundo Parizotto e Lamberts (2011), em comparação com as coberturas cerâmicas, a cobertura verde pode reduzir a transferência de calor para o interior das edificações durante os meses mais quentes. A massa térmica contribui para a absorção de calor e atrasa a transferência de calor do exterior para o interior da edificação, diminuindo a variação da temperatura do ar interno ao longo do dia. De acordo com os autores, o melhor isolamento da cobertura verde reduz a perda de calor no inverno, porém, o sombreamento e a evapotranspiração contribuem para a redução do ganho de calor nesse período.

As coberturas verdes são coberturas vegetadas, cuja estrutura pode ser composta por algumas ou várias camadas, conforme a necessidade ou função. As camadas básicas de uma cobertura verde são: vegetação, substrato, filtragem, drenagem e impermeabilização sobre laje ou forro. A espessura do substrato e o índice de área foliar da vegetação estão dentre as características de projeto das coberturas verdes mais influentes sobre o desempenho térmico destas coberturas (DIAS, 2016). Além disso, a literatura destaca a importância da análise de necessidade de irrigação das coberturas verdes, que deve ser ajustada conforme as condições climáticas (ZINZI; AGNOLI, 2012).

Silva *et al.* (2016) modelaram coberturas verdes com diferentes espessuras do substrato no clima quente de Lisboa, onde a demanda de resfriamento é predominante. Os autores concluíram que, no verão, o aumento da espessura do substrato implica em maior capacidade de retenção de água no substrato e no aumento da evapotranspiração, diminuindo significativamente a demanda de energia. Entretanto, no inverno, os efeitos do aumento da espessura do substrato são insignificantes e podem ser contrabalanceados pela evapotranspiração e pelo sombreamento da vegetação.

Pianella *et al.* (2017) avaliaram coberturas verdes extensivas em Melbourne, caracterizada pelo clima mediterrâneo e verificaram que o índice de área foliar (IAF) é fundamental para reduzir a demanda de energia no clima quente da localidade em estudo, contudo, seu efeito diminui em dias nublados. Em dias de sol, uma cobertura verde com IAF de 5 pode apresentar a temperatura do substrato até 25°C menor que uma cobertura verde com IAF igual a 0,01.

Além disso, é fundamental investigar a influência de características de projeto na localidade de interesse, visto que as condições climáticas afetam de maneira significativa o desempenho térmico de coberturas verdes. Nesse sentido, este trabalho tem o intuito de avaliar diferentes configurações de coberturas verdes na melhoria do desempenho térmico das edificações de forma passiva, reduzindo o consumo de energia em sistemas mecânicos de condicionamento térmico, em Florianópolis – SC.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é comparar o desempenho térmico de coberturas verdes com diferentes características de projeto (espessura do substrato e índice de área foliar) e diferentes condições de irrigação, sujeitas às condições climáticas de Florianópolis – SC.

3. MÉTODO

A fim de atender aos objetivos deste estudo, realizaram-se simulações computacionais de desempenho térmico de modelos de teste de coberturas verdes ao longo de um ano, por meio do programa computacional *EnergyPlus* 9.3.

3.1. Arquivo climático

As simulações foram realizadas para todos os dias do ano utilizando o arquivo climático TMY 2004-2018 de Florianópolis – SC. De acordo com a classificação Köppen-Geiger, a cidade possui clima subtropical (Cfa) com temperatura média no mês mais frio inferior a 18ºC e temperatura média no mês mais quente acima de 22ºC, com verões quentes, concentração das chuvas nos meses de verão e sem estação seca definida (PANDOLFO *et al*., 2002).

3.2. Modelo simulado

O modelo utilizado nas simulações deste trabalho consiste em uma única zona térmica de dimensões 4 m x 4 m, com 3 m de altura, a fim de representar um ambiente de 16 m² e desconsiderar a influência de zonas adjacentes, conforme a Figura 1(a). Com a finalidade de analisar isoladamente os processos de troca de calor que ocorrem na cobertura, superfícies adiabáticas (poliestireno expandido) foram utilizadas para compor as paredes e o piso da zona simulada.

O ambiente interno foi artificialmente condicionado ao longo de todo o período simulado a partir de um sistema de condicionamento do tipo ideal (*Ideal Loads Air System*), o qual informa a carga térmica necessária para manter a temperatura do ambiente dentro do intervalo estabelecido. Os *setpoints* adotados para o termostato foram 21ºC para aquecimento e 26ºC para resfriamento. Estes valores foram determinados com base na NBR 16401 (ABNT, 2008), que recomenda temperatura operativa entre 22,5°C e 26,0°C no verão e entre 21,0°C e 24,0°C no inverno, de forma a simular um ambiente de relativo conforto térmico aos usuários tanto no verão, quanto no inverno.

As coberturas verdes foram compostas pelas seguintes camadas: vegetação, substrato, filtragem, drenagem, impermeabilização e laje mista (armada em blocos cerâmicos), como mostra a Figura 1(b).

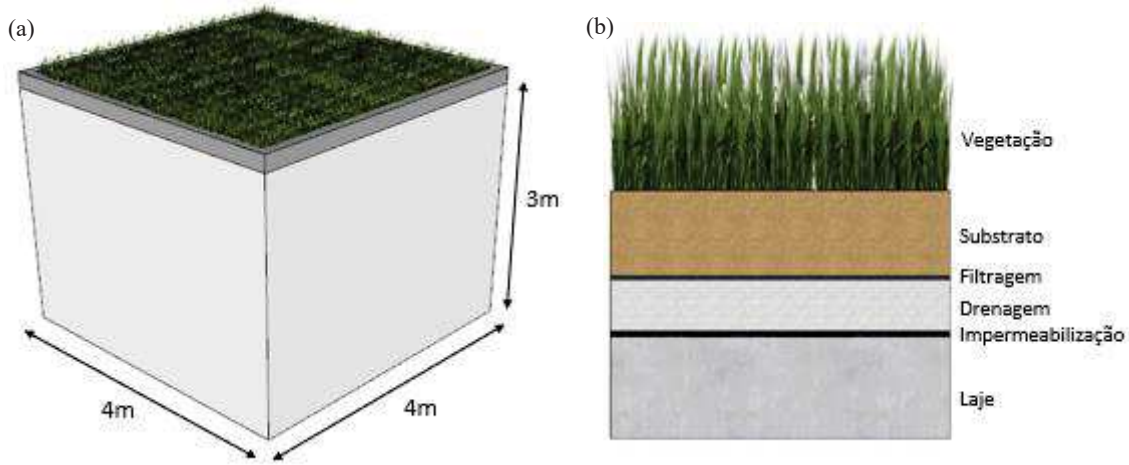

Figura 1 – (a) Representação do modelo utilizado e (b) perfil da cobertura verde utilizada.

A Tabela 1 descreve as espessuras e as propriedades térmicas dos materiais utilizados em todas as simulações, conforme Dias (2016). Para as demais propriedades, foi utilizado o valor padrão (*default*) fornecido pelo programa. Em todas as simulações, as configurações do ambiente simulado foram mantidas constantes, com exceção das variáveis de projeto das coberturas verdes (espessura do substrato e índice de área foliar) e das condições de irrigação, que serão apresentadas na seção 3.3.

Tabela 1 – Dados físicos dos materiais da envoltória do modelo simulado (DIAS, 2016).

Elemento	**Material**	**Espessura (m)**	**Densidade (kg/m³)**	**Condutividade térmica (W/m.K)**	**Calor específico (J/kg.K)**
Paredes e piso	Poliestireno expandido	0,15	10	0,001	2.500
Cobertura verde	Camada filtrante	0,005	160	0,06	2.500
	Camada drenante	0,06	800	0,08	920
	Impermeabilização	0,007	1.200	0,17	920
	Laje mista	0,12	1.087	1,05	920

3.3. Variáveis de simulação

O modelo de coberturas verdes incorporado ao *EnergyPlus* (SAILOR, 2008) permite configurar diversos parâmetros relativos às camadas de vegetação e substrato através do objeto *Material:RoofVegetation*. Assim, primeiramente, um modelo base foi configurado e simulado utilizando os valores padrão (*default*) fornecidos pelo programa para essas camadas e não foi utilizada irrigação. Na sequência, foram alteradas isoladamente as seguintes variáveis: espessura do substrato (de 0,1 para 0,2, 0,3, 0,4 e 0,5 m), índice de área foliar (de 1 para 2, 3, 4 e 5) e condições de irrigação no objeto *RoofIrrigation* (de ausente para somente no período mais quente e durante todo o ano). Logo, foram realizadas onze simulações (a simulação do caso base e outras quatro simulações alterando variáveis).

De modo a facilitar a visualização dos resultados, as coberturas verdes com valores intermediários de espessura do substrato e índice de área foliar foram suprimidas da representação gráfica. Assim, foram demonstrados apenas os resultados obtidos para as coberturas verdes com espessura do substrato 0,1 e 0,5 m, com índice de área foliar 1 e 5 e com diferentes configurações de irrigação, totalizando cinco simulações, conforme a Tabela 2.

A irrigação da cobertura foi configurada para ocorrer uma vez ao dia, distribuída durante duas horas. Ao longo do ano simulado, a irrigação acumulada foi de 4,90 x 10^8 mm na condição de irrigação durante todo o ano e de 3,37 x 10^8 mm na condição de irrigação somente no período mais quente. O "período mais quente" considerado em uma das condições de irrigação refere-se ao período do ano em que se verificou fluxo de calor positivo através da laje, ou seja, do meio externo para o interior da zona térmica. Dessa forma, nessa condição de irrigação, o período irrigado compreendeu os intervalos de tempo de 01/01 a 16/05 e 30/08 a 31/12.

Tabela 2 – Dados físicos das camadas de vegetação e substrato das coberturas verdes.

Camada	**Parâmetro**	**Caso base**	**ES05**	**IAF5**	**IPARC**	**IANUAL**
Toda a cobertura	Irrigação	Ausente	Ausente	Ausente	Período mais quente	Todo o ano
Vegetação	Altura da vegetação (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Índice de área foliar (IAF)	1	1	5	1	1
	Refletância das folhas	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
	Emissividade das folhas	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	Resistência estomática mínima (s/m)	180	180	180	180	180
Substrato	Rugosidade	Média	Média	Média	Média	Média
	Espessura (m)	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1
	Condutividade (W/m.K)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
	Densidade do solo seco (kg/m³)	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
	Calor específico do solo seco (J/kg.K)	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
	Absortância térmica	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	Absortância solar	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
	Absortância visível	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	Conteúdo volumétrico saturado de umidade	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	Conteúdo volumétrico residual de umidade	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Conteúdo volumétrico inicial de umidade	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Método de cálculo da difusão da umidade no solo	Avançado	Avançado	Avançado	Avançado	Avançado

ES05: espessura do substrato 0,5 m; IAF5: índice de área foliar 5; IPARC: irrigação parcial (somente no período mais quente) e IANUAL: irrigação durante todo o ano.

3.4. Análise dos resultados

Nesta etapa, buscou-se compreender a influência que a espessura do substrato, o índice de área foliar e as condições de irrigação da cobertura verde exercem sobre o desempenho térmico do ambiente simulado.

Para as cinco simulações, o desempenho térmico anual foi avaliado através das variáveis de saída: temperatura da face interna da laje de cobertura, fluxo de calor na laje e cargas térmicas ideais de aquecimento e resfriamento.

4. RESULTADOS

4.1. Espessura do substrato

O aumento da espessura do substrato de 0,1 m para 0,5 m promoveu diminuição na amplitude térmica ao longo do ano, conforme pode se observar na Figura 2. A cobertura verde com substrato mais espesso manteve a temperatura da face interna da laje de cobertura entre 21,6 e 27,5ºC (amplitude térmica de 5,9ºC no ano), enquanto a cobertura verde com substrato mais fino apresentou temperaturas da face interna entre 20,3 e 28,3ºC (amplitude térmica de 8,0ºC no ano). O aumento da espessura proporcionou temperaturas da face interna mais baixas no verão e menor variação da temperatura da face interna no inverno, como mostra a Tabela 3.

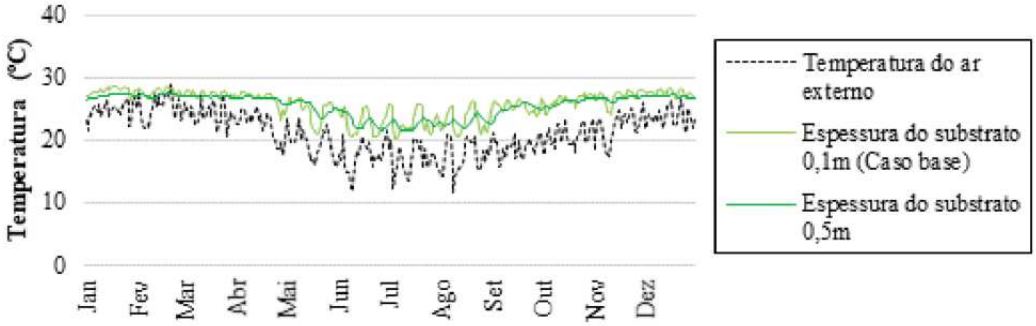

Figura 2 – Temperatura da face interna da laje de cobertura para diferentes espessuras do substrato.

Tabela 3 – Temperaturas média, mínima e máxima da face interna da laje de cobertura para diferentes espessuras do substrato.

Estação	Temperatura (°C)	Espessura do substrato 0,1 m (Caso base)	Espessura do substrato 0,5 m
Verão	Média	27,6	27,0
	Mínima	26,5	26,5
	Máxima	28,5	27,4
Inverno	Média	23,6	23,2
	Mínima	20,3	21,5
	Máxima	26,7	26,1

Com relação ao fluxo de calor na laje (Figura 3), com o aumento na espessura do substrato verifica-se redução nos valores de fluxo de calor durante os meses mais quentes do ano (entre setembro e maio). O valor médio de fluxo de calor nesse período foi de 3,91 W para a cobertura com espessura do substrato 0,1 m e de 2,21 W para a cobertura com espessura do substrato 0,5 m, indicando que há menor fluxo de calor para o ambiente interno.

Durante os meses mais frios do ano (entre maio e setembro), no caso com espessura de 0,1 m, alguns dos valores mostram-se negativos, indicando que o fluxo ocorre do interior da zona para o ambiente externo, já no caso com espessura de 0,5m os valores de fluxo ficam próximos de zero. Nesse período, o valor médio de fluxo de calor foi de 0,04 para 0,12 W com o aumento da espessura do substrato. Isso significa que foi menor o fluxo de calor do ambiente interno para o exterior.

Optou-se por analisar a diferença absoluta entre os valores médios de fluxo de calor, e não percentual, uma vez que algumas configurações de cobertura verde apresentaram valor médio de fluxo de calor negativo. Nesses casos, as variações percentuais resultam em valores bastante elevados em comparação com as variações percentuais entre números positivos, tornando inviável confrontar esses dados.

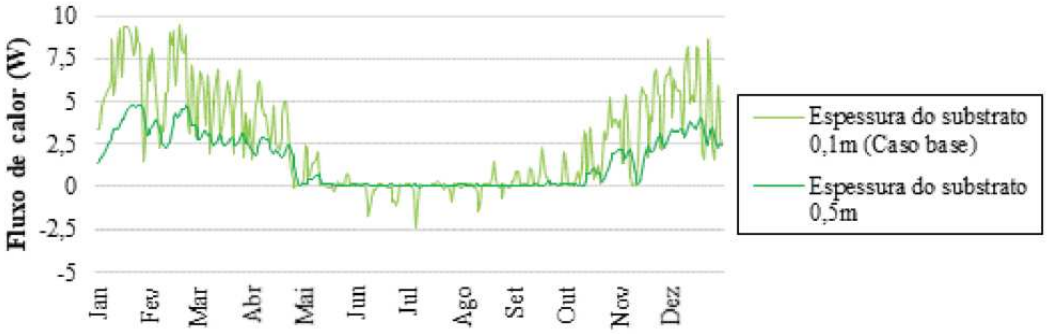

Figura 3 – Fluxo de calor na laje (condução) para diferentes espessuras do substrato.

A Figura 4 apresenta os valores obtidos correspondentes às cargas térmicas ideais de aquecimento e resfriamento acumuladas ao longo de todo o ano simulado, sendo a carga térmica total a soma destes valores. Observa-se que o modelo simulado de cobertura verde com substrato mais espesso promove redução nas cargas térmicas tanto de aquecimento, quanto de resfriamento. O aumento da espessura do substrato implica na redução da carga térmica total em 46,2%.

A redução na carga térmica de resfriamento com o aumento da espessura do substrato condiz com o aumento da evapotranspiração (Tabela 4). Em períodos quentes, quanto maior a evapotranspiração, menor a transferência de calor do exterior para o interior do ambiente e, portanto, menor a carga térmica de resfriamento nesses períodos. Em dias frios, a evapotranspiração favorece a perda de calor do sistema, no entanto, há também o efeito de inércia térmica do substrato, que favorece a manutenção de calor no ambiente.

Os resultados corroboram com os encontrados por Silva *et al.* (2016), em um estudo em Lisboa, quanto à redução significativa da carga térmica de resfriamento. Nos meses mais frios, o efeito da inércia térmica do substrato parece ter sido superior ao da evapotranspiração para o caso de Florianópolis, tornando desprezível a carga térmica de aquecimento.

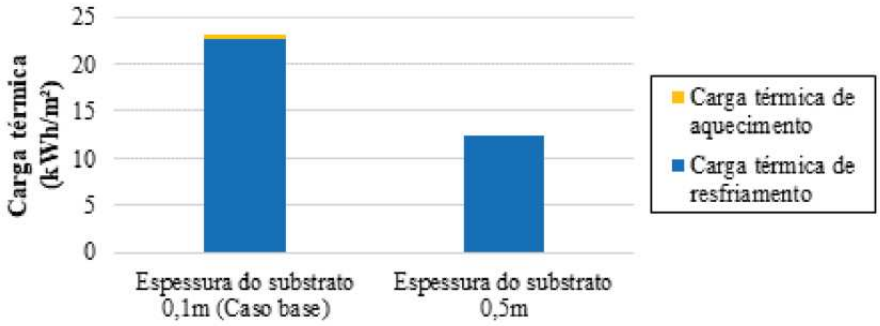

Figura 4 – Cargas térmicas ideais de aquecimento e resfriamento para diferentes espessuras do substrato.

Tabela 4 – Evapotranspiração anual para diferentes espessuras do substrato.

Espessura do substrato (m)	Evapotranspiração (mm/ano)
0,1 (Caso base)	$5{,}78 \times 10^{6}$
0,5	$2{,}31 \times 10^{7}$

4.2. Índice de área foliar (IAF)

O aumento do índice de área foliar de 1 para 5 resulta em diminuição da temperatura da face interna da laje de cobertura em todas as épocas do ano, conforme mostram a Figura 5 e a Tabela 5, diferentemente do aumento da espessura do substrato que promove redução da temperatura apenas nos meses mais quentes. A máxima diferença de temperatura em um dia entre os modelos simulados foi de 5,14ºC e ocorreu no dia 20/09. Os resultados apoiam os encontrados por Pianella *et al.* (2017), que verificaram redução da temperatura nas camadas da cobertura verde com o aumento do IAF.

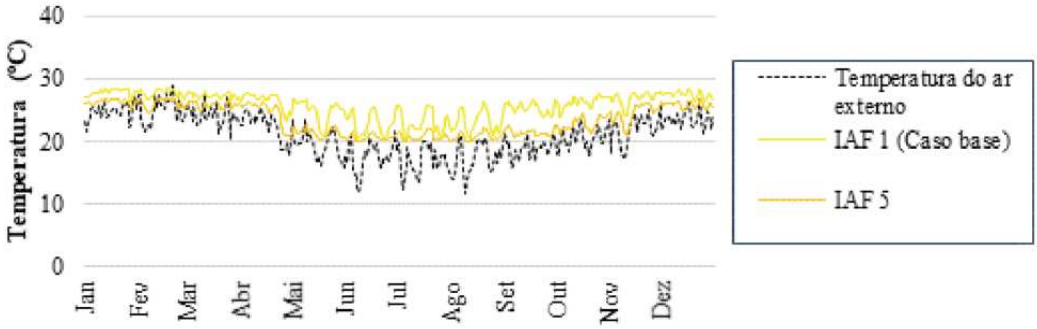

Figura 5 – Temperatura da face interna da laje de cobertura para diferentes índices de área foliar.

Tabela 5 – Temperaturas média, mínima e máxima da face interna da laje de cobertura para diferentes índices de área foliar.

Estação	Temperatura (°C)	IAF 1 (Caso base)	IAF 5
Verão	Média	27,6	26,1
	Mínima	26,5	24,6
	Máxima	28,5	26,9
Inverno	Média	23,6	20,9
	Mínima	20,3	19,9
	Máxima	26,7	22,5

De maneira similar, o aumento do índice de área de foliar resulta em menor fluxo de calor no período mais quente (entre setembro e maio), com redução do valor médio de fluxo de calor de 3,91 para 0,43 W, favorecendo o resfriamento do ambiente interno (Figura 6).

Em contrapartida, no período mais frio (entre maio e setembro), o aumento desse índice gera valores de fluxo menores (mais negativos). Com o aumento do índice de área foliar, o valor médio de fluxo de calor diminuiu de 0,04 para -1,08 W. Isso indica parcelas maiores de fluxo de calor do interior da zona simulada para o ambiente externo, aumentando a demanda de aquecimento da zona térmica.

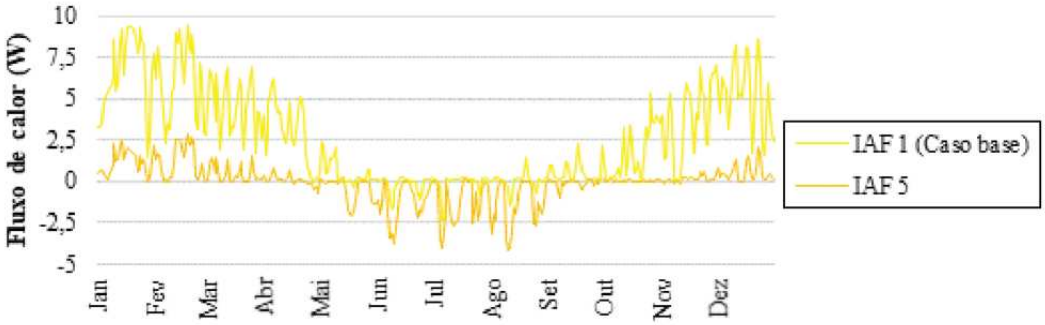

Figura 6 – Fluxo de calor na laje (condução) para diferentes índices de área foliar.

Como resultado, o modelo de cobertura verde simulado com IAF de 5 apresenta menor carga térmica de resfriamento e maior carga térmica de aquecimento se comparado com o modelo com IAF de 1 (Figura 7). Isso provavelmente ocorre devido à maior área de vegetação e, consequentemente, maior sombreamento da cobertura e maior evapotranspiração ao longo de todo o ano, como pode ser verificado na Tabela 6. Através da evapotranspiração, parte do calor absorvido pela vegetação é transformado em calor latente, reduzindo a transferência de calor para o interior do ambiente e a carga térmica de resfriamento nos meses mais quentes. No entanto, nos meses mais frios, o efeito da evapotranspiração favorece a perda de calor do ambiente interno, o que neste caso, implicou no aumento da carga térmica de aquecimento.

Analisando ao longo de todo o ano, o aumento do índice de área foliar de 1 para 5 promoveu redução de 74,7% na carga térmica total anual.

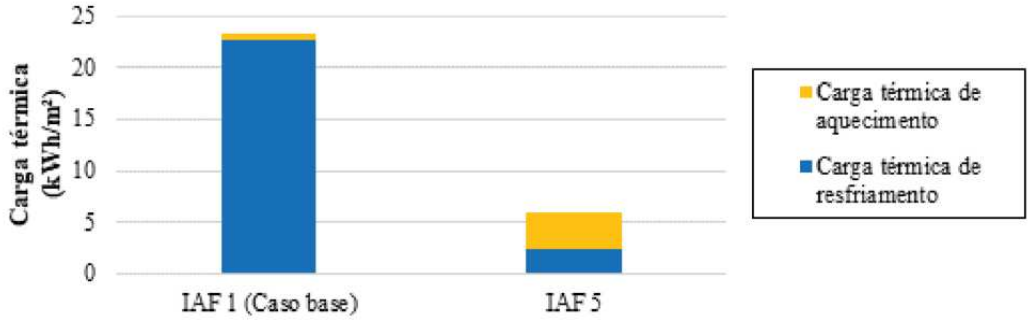

Figura 7 – Cargas térmicas ideais de aquecimento e resfriamento para diferentes índices de área foliar.

Tabela 6 – Evapotranspiração anual para diferentes índices de área foliar.

Índice de área foliar	Evapotranspiração (mm/ano)
1 (Caso base)	$5{,}78 \times 10^{6}$
5	$4{,}90 \times 10^{8}$

4.2. Irrigação da cobertura

A partir da Figura 8 e da Tabela 7, observa-se que na condição de irrigação da cobertura verde durante todo o ano ocorre redução das temperaturas da face interna da laje de cobertura em todos os meses simulados, se comparada com a condição sem irrigação.

A irrigação somente no período mais quente do ano parece ser a estratégia mais favorável ao desempenho térmico da zona simulada, uma vez que reduz as temperaturas da face interna nos meses mais quentes em comparação com o caso sem irrigação, e mantém as temperaturas mais elevadas nos meses mais frios. Ressalta-se que, na prática, deve ser avaliada a necessidade de uma irrigação mínima para garantir o desenvolvimento e a sobrevivência da vegetação utilizada.

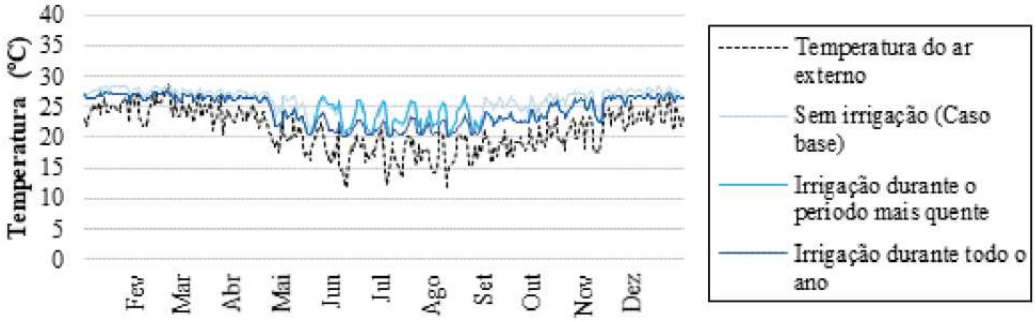

Figura 8 – Temperatura da face interna da laje de cobertura para diferentes condições de irrigação.

Tabela 7 – Temperaturas média, mínima e máxima da face interna da laje de cobertura para diferentes índices de área foliar.

Estação	Temperatura (°C)	Sem irrigação (Caso base)	Irrigação durante o período mais quente	Irrigação durante todo o ano
Verão	Média	27,6	26,7	26,7
	Mínima	26,5	25,6	25,6
	Máxima	28,5	27,5	27,5
Inverno	Média	23,6	23,1	21,7
	Mínima	20,3	20,4	20,0
	Máxima	26,7	26,5	24,1

Na Figura 9, observa-se que na condição de irrigação durante todo o ano os valores de fluxo de calor são menores nos meses mais quentes (entre setembro e maio) se comparados com a condição sem irrigação. Nesse caso, o valor médio de fluxo de calor passou de 3,91 para 1,34 W, indicando menor fluxo do exterior para o interior da zona simulada. No entanto, nos meses mais frios (entre maio e setembro), os valores

também são menores (mais negativos). Nesse período, o valor médio de fluxo de calor diminuiu de 0,04 para -0,62 W, o que indica maior fluxo de calor do interior da zona para o ambiente externo.

Na condição de irrigação somente no período mais quente há otimização nos valores e no sentido do fluxo de calor. Nos meses mais quentes, é menor o fluxo do exterior para o interior da zona em comparação com a condição da cobertura não irrigada (valor médio de fluxo de calor diminuiu de 3,91 para 1,33 W). Em contrapartida, nos meses mais frios, o fluxo do interior da zona para o exterior também é menor (redução de 0,04 para 0,03 W no valor médio de fluxo de calor), no entanto, essa redução é inferior à do caso com irrigação durante todo o ano.

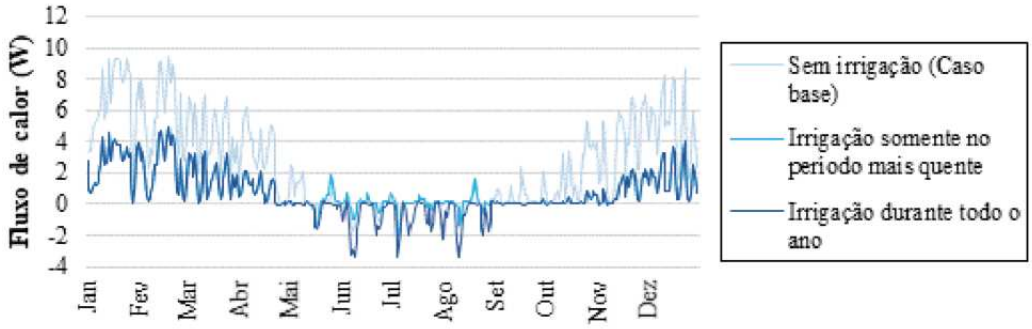

Figura 9 – Fluxo de calor na laje (condução) para diferentes condições de irrigação.

Com relação às cargas térmicas ideais, verifica-se um cenário mais otimizado na condição de irrigação somente no período mais quente, reduzindo a carga térmica total anual, como mostra a Figura 10. Com relação à condição não irrigada, há redução na carga térmica total anual de 65,0% e 59,4% para as condições de irrigação somente no período mais quente e durante todo o ano, respectivamente. Salienta-se que para o crescimento e manutenção da vegetação, deve ser avaliada a necessidade de uma irrigação mínima, conforme a vegetação selecionada e a localidade de implantação da cobertura verde. Ainda, ressalta-se que os dados de precipitação não foram considerados como dados de entrada, sendo a umidade contida nas camadas de vegetação e substrato proveniente da irrigação.

Observa-se na Tabela 8 que há maior evapotranspiração anual com o aumento do período irrigado. Na condição de irrigação durante todo o ano, a maior taxa de evapotranspiração implica em menor transferência de calor do exterior para o interior do ambiente tanto nos meses mais quentes, quanto nos meses mais frios. Já no caso de irrigação somente no período mais quente, a evapotranspiração ocorre de maneira mais significativa nos meses mais quentes, reduzindo a carga térmica de resfriamento e mantendo a carga térmica de aquecimento equivalente à condição não irrigada.

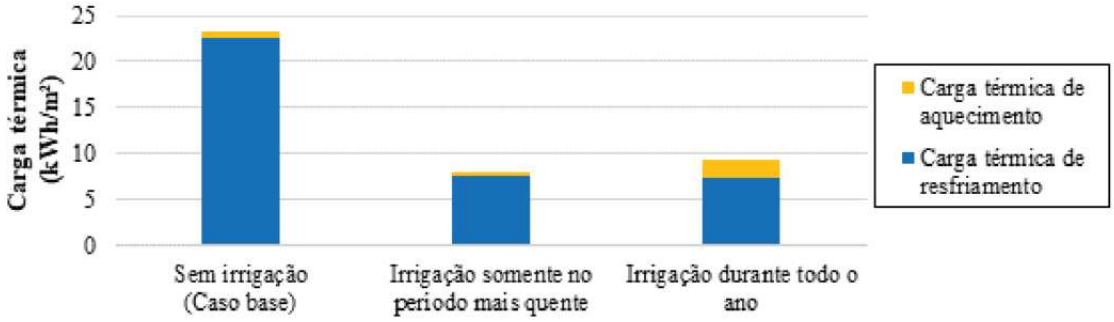

Figura 10 – Cargas térmicas ideais de aquecimento e resfriamento para diferentes condições de irrigação.

Tabela 8 – Evapotranspiração anual para diferentes condições de irrigação.

Condição de irrigação	**Evapotranspiração (mm/ano)**
Sem irrigação (Caso base)	$5{,}78 \times 10^{6}$
Somente no período mais quente	$3{,}53 \times 10^{6}$
Durante todo o ano	$4{,}26 \times 10^{8}$

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos é possível verificar que o aumento da espessura do substrato protege a face interna de temperaturas extremas e de grandes variações de temperaturas. Isso ocorre devido ao aumento da evapotranspiração e ao efeito de inércia térmica do substrato. Quanto ao aumento do índice de área foliar, apesar de contribuir com a redução das temperaturas superficiais durante os meses mais quentes, também reduziu as temperaturas superficiais durante os meses mais frios, aumentando a demanda de aquecimento. Isso possivelmente se dá pelo aumento do sombreamento da cobertura e pelo aumento de evapotranspiração da vegetação durante todo o ano. A irrigação da cobertura verde somente no período mais quente reduziu as temperaturas superficiais nos meses mais quentes, bem como manteve mais elevadas as temperaturas nos meses mais frios do ano, devido à maior evapotranspiração da vegetação e evaporação do substrato apenas no período mais quente.

Com relação às cargas térmicas ideais, as três estratégias avaliadas (aumento da espessura do substrato, aumento do índice de área foliar e irrigação da cobertura) resultam em um melhor desempenho térmico da cobertura verde. O aumento do índice de área foliar e a irrigação somente no período mais quente foram as estratégias que apresentaram as maiores reduções na carga térmica total anual (74,7% e 65,0% menor que no caso base, respectivamente).

Assim, para o caso da cidade de Florianópolis – SC, a escolha de uma vegetação com maior índice de área foliar e a implantação de um sistema de irrigação são alternativas mais eficazes para a melhoria do desempenho térmico de coberturas verdes se comparadas com o aumento da espessura do substrato.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 16401**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2008.

DIAS, A. E. **Desempenho térmico de uma cobertura verde em simulações computacionais em três cidades brasileiras**. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

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

MATHEUS, C.; CAETANO, F. D. N.; MORELLI, D. D. D. O.; LABAKI, L. C. Desempenho térmico de envoltórias vegetadas em edificações no sudeste brasileiro. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 71-81, 2016.

PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JR, V. P. da; MASSIGNAM, A. M., PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F.V. **Atlas climatológico digital do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, 2002. CD-Rom.

PARIZOTTO, S.; LAMBERTS, R. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 7, p. 1712-1722, 2011.

PIANELLA, A.; AYE, L.; CHEN, Z.; WILLIAMS, N. S. Substrate depth, vegetation and irrigation affect green roof thermal performance in a mediterranean type climate. **Sustainability**, v. 9, n. 8, p. 1451, 2017.

SAADATIAN, O. et al. A review of energy aspects of green roofs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 155-168, 2013.

SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 8, p. 1466-1478, 2008.

SILVA, C. M.; GOMES, M. G.; SILVA, M. Green roofs energy performance in Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 116, p. 318-325, 2016.

VAN RENTERGHEM, T.; BOTTELDOOREN, D. Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. **Building and Environment**, v. 44, n. 5, p. 1081-1087, 2009.

YAO, L.; WU, Z.; WANG, Y.; SUN, S.; WEI, W.; XU, Y. Does the spatial location of green roofs affects runoff mitigation in small urbanized catchments?. **Journal of Environmental Management**, v. 268, p. 110707, 2020.

ZINZI, M.; AGNOLI, S. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 66-76, 2012.