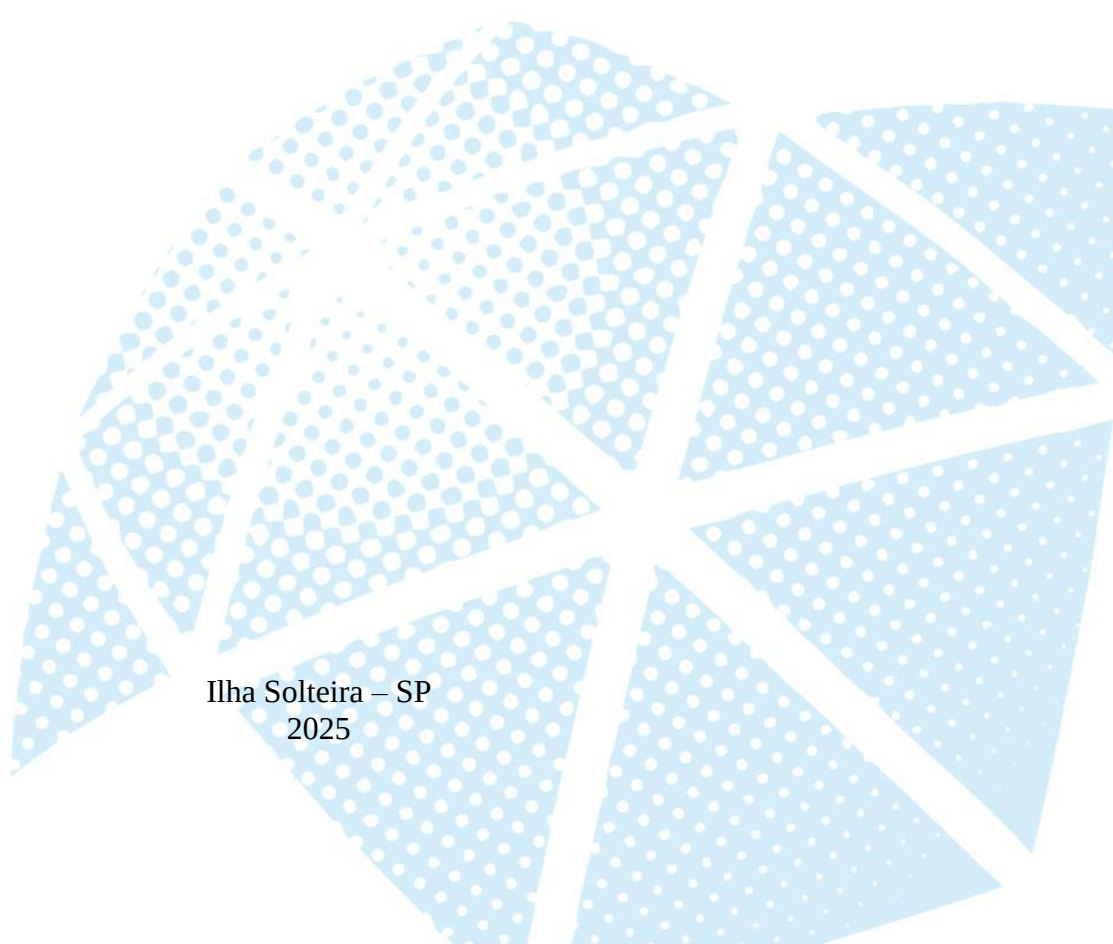


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LEONARDO GONÇALVES

**INFLUÊNCIA DE PROPRIEDADES FÍSICO-TÉRMICAS NA SIMULAÇÃO
DO CONFORTO TÉRMICO COM ESPÉCIES DE CORTINAS VERDES**



Ilha Solteira – SP
2025

LEONARDO GONÇALVES

**INFLUÊNCIA DE PROPRIEDADES FÍSICO-TÉRMICAS NA SIMULAÇÃO
DO CONFORTO TÉRMICO COM ESPÉCIES DE CORTINAS VERDES**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Materiais da Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. André Luís Christoforo

Ilha Solteira – SP
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

G635i Gonçalves, Leonardo.
Influência de propriedades físico-térmicas na simulação do conforto térmico com espécies de cortinas verdes / Leonardo Gonçalves. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
101 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais de Construção Civil, 2025

Orientador: Luis André Christoforo
Inclui bibliografia

1. Simulação. 2. Fachadas verdes. 3. Sustentabilidade. 4. Parametrização. 5. Propriedades físico-térmicas.

Elaborada por Raiane da Silva Santos - CRB-8/9999

IMPACTO POTENCIAL DA PESQUISA

O impacto potencial desta pesquisa está relacionado à promoção de soluções passivas para a melhoria do desempenho térmico de edificações, por meio do uso de sistemas de fachadas verdes compostos por espécies de plantas trepadeiras. Ao compreender como as propriedades físico-térmicas dessas espécies influenciam o comportamento termoenergético das construções, a pesquisa contribui com diretrizes para o uso mais eficiente e sustentável de recursos naturais no ambiente urbano. Além de mitigar os efeitos das ilhas de calor e reduzir a demanda por sistemas artificiais de climatização, os resultados apresentados podem subsidiar políticas públicas e práticas projetuais mais conscientes. A pesquisa está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS (11, 12 e 13), ao favorecer cidades e comunidades mais sustentáveis, promover padrões sustentáveis de consumo e produção e contribuir para o enfrentamento das mudanças climáticas e seus impactos.

POTENTIAL IMPACT OF THE RESEARCH

The potential impact of this research is related to the promotion of passive solutions for improving the thermal performance of buildings through the use of green façade systems composed of climbing plant species. By understanding how the physical and thermal properties of these species influence the thermo-energetic behavior of buildings, this study contributes with technical guidelines for the efficient and sustainable use of natural resources in urban environments. In addition to mitigating the urban heat island effect and reducing the demand for artificial cooling systems, the results may support public policies and design practices focused on environmental responsibility. This research aligns with the Sustainable Development Goals – SDGs (11, 12, and 13), by fostering more sustainable cities and communities, promoting responsible consumption and production patterns, and contributing to climate change mitigation and adaptation strategies.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Influência de Propriedades Físico-térmicas na Simulação do Conforto Térmico com Espécies de Cortinas Verdes

AUTOR: LEONARDO GONÇALVES

ORIENTADOR: ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área: Engenharia de Construção Civil pela Comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente

ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO

Data: 01/08/2025 06:50:42-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar



Documento assinado digitalmente

VICTOR ALMEIDA DE ARAUJO

Data: 31/07/2025 17:46:41-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. VICTOR ALMEIDA DE ARAUJO (Participação Virtual)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Documento assinado digitalmente

HERISSON FERREIRA DOS SANTOS

Data: 31/07/2025 18:33:34-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. HERISSON FERREIRA DOS SANTOS (Participação Virtual)

Departamento de Ensino / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO

Ilha Solteira, 31 de julho de 2025

Dedico essa pesquisa aos meus professores
que apoiaram minha carreira acadêmica, e à
um futuro melhor, com mais pensamentos
sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares que me apoiaram e me incentivaram na minha carreira acadêmica, principalmente meus pais, Silmara Sanches e Luciano Gonçalves.

À minha namorada, Gabriela Correa, que me apoiou, ajudou e nunca me deixou desistir, acompanhou todo o meu trajeto de pesquisador e sempre aconselhou e me animou da melhor forma.

Aos meus amigos, colegas e parceiros de pesquisa, que acompanharam minha trajetória durante esses anos de mestrado.

Aos meus amigos, especialmente, Celso Lima, Breno Oliveira e Bruno Casare, que sempre me ouviram, deram dicas e estiveram ao meu lado no meu objetivo.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Votuporanga que me garantiu a oportunidade de ingressar no curso de Engenharia Civil e adquirir amplos conhecimentos na área, além de proporcionar a porta de entrada para o campo de pesquisa em sustentabilidade.

À Prof^a. Dr^a. Naiara Luchini de Assis Kaimoti, minha primeira orientadora, desde o ensino médio, que me apresentou a pesquisa sobre sustentabilidade e paisagismo, que me incentivou na pesquisa científica e me aconselhou sempre que precisei.

À engenheira Patrícia Elena Rossini Lui, que supervisionou meu estágio na graduação, e também foi minha chefe por vários anos, me ensinando muito sobre a área da construção civil na prática e sobre a ética e os valores da profissão.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Luis Christoforo, que respondeu meu e-mail, me escolheu como orientado, e acompanhou de perto todo o desenvolvimento da pesquisa, assim como sempre me orientou e compartilhou seus conhecimentos.

Ao Prof. Dr. Herisson Ferreira dos Santos e Prof. Dr. Victor Almeida de Araujo por meu auxiliarem com a minha pesquisa, com seus vastos conhecimentos e precisas observações.

Ao Prof. Dr. Vinicius Borges de Moura Aquino que me deu a oportunidade de acompanhar suas aulas e ensino durante os períodos de Estágio Docência.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, seus funcionários, a Seção Técnica da Pós-Graduação (STPG) e ao corpo docente.

À CAPES pelo auxílio financeiro por meio das bolsas ofertadas no Programa de Pós-Graduação da UNESP.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, me ajudaram e contribuíram
para a realização dessa pesquisa.

RESUMO

O uso de sistemas de jardins verticais tem se consolidado, ao longo dos anos, como uma estratégia eficaz para a promoção do conforto térmico e da sustentabilidade ambiental em edificações. O estudo tem sua relevância evidenciada em compreender como as propriedades físicas das fachadas verdes influenciam as condições de desempenho térmico em ambientes construídos. A presente investiga as propriedades físico-térmicas de espécies de plantas trepadeiras utilizadas em fachadas verdes, com o objetivo de avaliar sua influência no desempenho térmico de edificações. Inicialmente, foi conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), que permitiu identificar as principais propriedades relevantes à simulação termoenergética e consolidar diretrizes para a caracterização técnica das espécies vegetais. A metodologia incluiu a modelagem de um ambiente piloto, seguido de simulações realizadas no software *DesignBuilder*. Os resultados do estudo paramétrico evidenciam que a espessura da camada de ar (propriedade L), situada entre a fachada verde e a superfície da edificação, exerce o maior impacto sobre a temperatura operativa interna. Dessa forma, a propriedade L é decisiva para a eficácia térmica dos sistemas de fachadas verdes, sendo a variável mais sensível na mitigação do ganho de calor, reforçando o papel dos jardins verticais como uma solução viável e eficiente para edificações mais sustentáveis e termicamente confortáveis.

Palavras-chave: simulação; fachadas verdes; sustentabilidade; parametrização; propriedades físico-térmicas.

ABSTRACT

The use of vertical garden systems has been consolidated over the years as an effective strategy for promoting thermal comfort and environmental sustainability in buildings. The relevance of this study lies in understanding how the physical properties of green façades influence thermal performance conditions in built environments. This research investigates the physical and thermal properties of climbing plant species used in green façades, aiming to evaluate their influence on the thermal performance of buildings. Initially, a Systematic Literature Review (SLR) was conducted, which made it possible to identify the main properties relevant to thermo-energetic simulation and to establish guidelines for the technical characterization of plant species. The methodology included the modeling of a pilot environment, followed by simulations carried out using the *DesignBuilder* software. The results of the parametric study highlight that the thickness of the air layer (property L), located between the green façade and the building surface, has the greatest impact on indoor operative temperature. Thus, property L is decisive for the thermal efficiency of green façade systems, being the most sensitive variable in mitigating heat gain, reinforcing the role of vertical gardens as a viable and efficient solution for more sustainable and thermally comfortable buildings.

Keywords: simulation; green facades; sustainability; parameterization; physical-thermal properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de jardins verticais: (a) cortinas verdes; (b) paredes verdes.	15
Figura 2 - Tipos de cortinas/fachadas verdes: (a) tradicional e (b) camada dupla.	15
Figura 3 - Fluxograma do método de pesquisa da RSL.	42
Figura 4 - Cobertura vegetal de Sedum.	47
Figura 5 - Cobertura vegetal com a espécie <i>Geranium macrorrhizum</i>	48
Figura 6 - Cobertura vegetal com a espécie <i>Hederaelix</i>	49
Figura 7 - Esquematização do modelo de análise, com o posicionamento dos sensores, (1) na camada vegetal e (2) nas superfícies da estrutura.	50
Figura 8 - Cobertura vegetal com a espécie <i>Parthenocissus tricuspidata</i>	50
Figura 9 - Fluxograma do processo de metodologia.	54
Figura 10 - Fluxograma do processo de metodologia.	55
Figura 11 - Vista em planta do modelo piloto.	58
Figura 12 - Vista em planta de cobertura do modelo piloto.	58
Figura 13 - Corte A, com vista frontal para a janela.	59
Figura 14 - Corte B, com vista frontal para a porta.	59
Figura 15 – Componente construtivo de parede de alvenaria.	60
Figura 16 – Componente construtivo de contrapiso.	63
Figura 17 – Componente construtivo de laje.	64
Figura 18 – Bloco de componente de telha termoacústica.	66
Figura 19. Componente de abertura, janela.	68
Figura 20 - Camadas da família das esquadrias - janela.	68
Figura 21. Configuração geral do material da fachada verde.	71
Figura 22. Configuração de superfície do material de fachada verde.	72
Figura 23 - Vista 3D do modelo piloto com a aplicação da cortina verde.	72
Figura 24. Conjunto de camadas dos componentes estruturais.	74
Figura 25. Propriedades térmicas de caracterização de materiais.	74
Figura 26. Configuração de localização, no DesignBuilder.	77
Figura 27. Aba de navegação, no DesignBuilder.	77
Figura 28. Configuração primária de análise de simulação.	78
Figura 29. Configuração de período de cálculo.	79
Figura 30. Gráfico e tabela de simulação térmica no DesignBuilder.	79
Figura 31. Gráfico de Pareto do modelo de regressão da Equação 34.	86
Figura 32. Estudo 01 - Sem a aplicação de fachadas verdes.	88
Figura 33. Estudo 02 - Aplicação da fachada verde da Simulação 02.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela RSL de parâmetros e resultados de pesquisa.....	43
Tabela 2 - Tabela RSL de classificação dos estudos aceitos.....	43
Tabela 3 - Tabela RSL de caracterização das espécies dos jardins verticais, dimensões.	44
Tabela 4 - Tabela RSL de caracterização das espécies dos jardins verticais, propriedades térmicas.....	45
Tabela 5 - Tabela RSL de caracterização das espécies dos jardins verticais, propriedades térmicas.....	46
Tabela 6 - Propriedades físicas e térmicas de uma parede de alvenaria com tijolos cerâmicos.	61
Tabela 7 - Propriedades físicas e térmicas do chapisco.....	61
Tabela 8 - Propriedades físicas e térmicas do emboço de argamassa.	62
Tabela 9 - Propriedades físicas e térmicas do reboco para regularização.	62
Tabela 10 - Propriedades físicas e térmicas do contrapiso.	64
Tabela 11 - Propriedades físicas e térmicas da laje maciça.....	65
Tabela 12 - Propriedades físicas e térmicas da chapa de aço da telha sanduíche.....	66
Tabela 13 - Propriedades físicas e térmicas do EPS da telha sanduíche.	67
Tabela 14 - Propriedades físicas e térmicas dos elementos de vidro.....	69
Tabela 15 - Propriedades físicas e térmicas do sistema de jardim vertical.	70
Tabela 16 - Tratamento de dados para o estudo paramétrico	75
Tabela 17. Tabela de Resultado Térmico das Simulações.	83

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	FUNDAMENTAÇÃO DAS PROPRIEDADES	20
2.1.1	Resistência térmica	21
2.1.2	Resistência térmica por condução	22
2.1.3	Resistência térmica por convecção	23
2.1.4	Resistência térmica em sistemas (análise em série e paralelo)	23
2.1.5	Condutividade térmica	24
2.1.6	Condutividade térmica para elementos tridimensionais	25
2.1.7	Condutividade térmica em situação de calor transiente	26
2.1.8	Transmitância térmica	28
2.1.9	Calor específico	30
2.1.10	Densidade	31
2.1.11	Porosidade	32
2.1.12	Condutividade térmica em materiais porosos	33
2.1.13	Difusividade térmica em materiais porosos	34
2.1.14	Permeabilidade	35
2.1.15	Reflexibilidade	36
2.1.16	Fluxo de calor por radiação	37
2.1.17	Fluxo de calor convectivo por radiação	37
2.1.18	Emissividade	38
2.2	RSL (Revisão Sistemática de Literatura)	40
3.	MATERIAL E MÉTODOS	54
3.1	MODELO PILOTO	55
3.1.1	Geometria e Dimensões	56
3.1.2	Caracterização e Materiais	60
3.1.3	Cortina Verde – Dimensões e Caracterização	69
3.2	ESTUDO PARAMÉTRICO	73
3.3	SIMULAÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO	76
3.4	MODELO DE REGRESSÃO MÚLTIPLA	80
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	81

4.1	REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	81
4.2	SIMULAÇÕES TÉRMICAS	82
4.2.1	Valores de Temperatura e Umidade Relativa	84
4.2.2	Análise dos Resultados das Simulações	85
4.2.4	Influência das Propriedades de Densidade e Calor Específico	87
5	CONCLUSÕES	90
	REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização transforma superfícies vegetais e solos permeáveis em áreas de concreto de alta densidade. Esse processo está fortemente atrelado ao consumo extremo de recursos naturais, como combustíveis fósseis, além do aumento da demanda energética para suprir as necessidades da sociedade atual (Dwaikat; Ali, 2018).

Em resultado da urbanização, trocar as superfícies vegetais e arborizadas por concreto, pavimentação asfáltica e outros sistemas de construção com materiais de alta densidade comumente usados na engenharia acarreta alterações nas propriedades físicas do ambiente, as quais culminam em influenciar o equilíbrio térmico e energético das áreas urbanas (Stewart *et al.*, 2012).

Os espaços urbanos que substituem as superfícies vegetais culminam em extensões, praticamente uniformes, de geometria em formato de cânions, uma vez que prédios de textura densa e grandes dimensões, afunilam os espaços de circulação do vento. Além do fato que prédios e construções no geral apresentam superfícies escuras, e são compostos de materiais impermeáveis, não reflexíveis, como concreto, asfalto, metal, cerâmica (Morris *et al.*, 2015). Somando a esses fatores apresentados, como um efeito potencializador, existem as ações antrópicas que se caracterizam como fontes térmicas, sendo essas, a utilização de combustíveis fósseis, combustão de maquinários industriais, e a utilização de sistemas de refrigeração (Wang *et al.*, 2018).

O conceito de design sustentável é estritamente ligado aos princípios de economia, ou seja, desenvolver um modelo de edificação que seja o menos agressivo o possível ao meio ambiente, que consuma recursos de forma controlada e possa se adaptar as mudanças climáticas e o aumento de temperatura do planeta (Mirasgedis *et al.*, 2007; Pilli-Sihvola *et al.*, 2010; Díaz-López *et al.*, 2017).

As mudanças climáticas trouxeram um aumento importante em consequências negativas às cidades e os habitantes delas. Aumento da temperatura e implicações no conforto térmico dos seres humanos se agravaram de forma preocupantes na atualidade (Gioro; Paprella, 2023).

Para atingir níveis de conforto térmico saudáveis ao metabolismo humano existe uma grande dependência de sistemas de HVAC (*heating, ventilation, and air conditioning*), essenciais para melhorar a ventilação e a refrigeração de ambientes em edificações, sistemas esses que exigem grande volume energético para seu funcionamento (Koh *et al.*, 2018).

Prédios e edificações no geral possuem elevadas cargas térmicas em sua estrutura, o que acaba por trazer à tona elevados níveis de temperatura, em seus interiores e seu entorno, tal fato justifica a elevada temperatura acerca do perímetro urbano, em comparação com ambientes cobertos com camadas vegetais mais volumosas, como área rural, matas e outros ambientes similares (Kandya; Mohan, 2018).

Modificações na superfície do solo alteram suas propriedades térmicas, o que reforça o fato das áreas urbanas armazenarem níveis altos de calor irradiado e calor sensível (esse último, responsável pelo aumento da temperatura dos corpos) durante o

dia, e no período noturno, esse calor armazenado é liberado na atmosfera. Dentro do perímetro urbano, os valores de transferência térmica são mínimos, por conta da umidade da atmosfera, o que leva a criar um contexto térmico nocivo para os seres humanos (Dwivedi; Mohan, 2018).

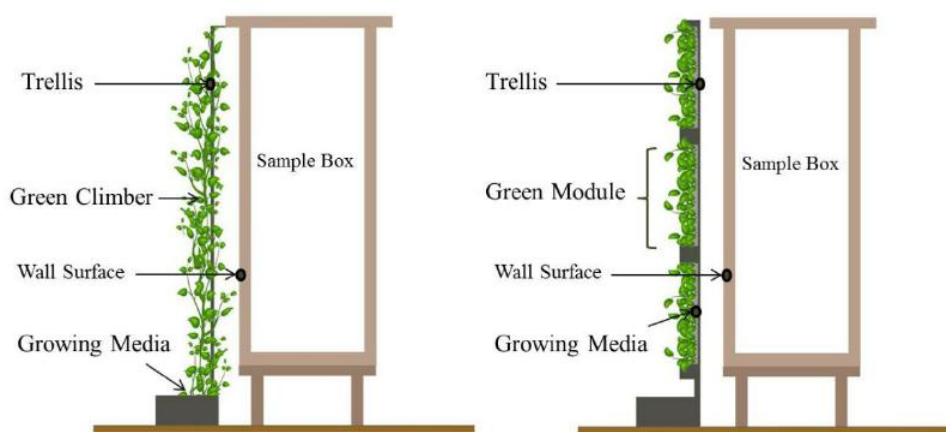
Construções sustentáveis envolvem uma abordagem sistemática que considera fatores sociais, uso de recursos e matérias primas e contextos climáticos (Thomas; Praveen, 2020). Assim como também utilizam metodologias e tecnologias que reduzem o consumo de recursos naturais, aperfeiçoam as características ecológicas das edificações e fomentam o ciclo de vida das estruturas (Abouhamad; Abuhamd, 2019).

É de conhecimento estabelecido que a integração de volumes de vegetação dentro do perímetro urbano é um meio altamente eficiente de garantir a redução dos efeitos estufa, da agravação do aquecimento global, das ilhas de calor e da densificação urbana, além de melhorar a qualidade do ar e dos recursos hídricos (Du *et al.*, 2017; Yang; Zhang; Li, 2015; Pugh *et al.*, 2012). Para remediar o contexto térmico atual e mitigar os efeitos térmicos negativos – como mal uso ou uso desenfreado de recursos naturais, aumento de poluição e aumento de temperatura – se torna necessário abordar soluções além do escopo tradicional, de modo a incorporar a vegetação no perímetro urbano. Um dos métodos mais difundidos, mais eficientes e de baixo custo para aumentar a densidade vegetal das estruturas, são os sistemas de jardins verticais, os quais aumentam a qualidade de vida do ambiente, fomentam as condições socioeconômicas da estrutura e ocupam pouco espaço, sendo bastante benéfico para edificações com limitações geométricas (Ascione *et al.*, 2012).

Os jardins verticais são conhecidos como uma tecnologia inovadora para fomentar a performance e o conforto térmico em ambientes, assim como uma redução significativa no consumo energético de aparelhos HVAC, melhorando o contexto termoenergético da sociedade atual (Pérez *et al.*, 2017).

Os sistemas de jardins verticais podem ser subdivididos em dois tipos principais, sendo eles, (a) as cortinas verdes (do inglês, *green facades*, da sigla GF), onde as espécies são plantadas no solo, diretamente no chão ou em vasos e disposições similares, de modo que a espécie possa crescer e se aderir em uma superfície adjacente, na maioria das vezes com o apoio de sistema de tramas (metálicas, plásticas ou em madeira) que auxilia seu crescimento e fixação. E (b) as paredes verdes (do inglês, *green walls*, conhecidos pela sigla GW), consistindo em módulos, fixados em uma parede ou superfície, preenchidos com substrato (solo ou outros tipos de materiais) onde as espécies de plantas e vegetação são plantadas para crescer e formar um volume vegetal (Rowe *et al.*, 2022). Os sistemas supracitados estão dispostos na Figura 1, a seguir.

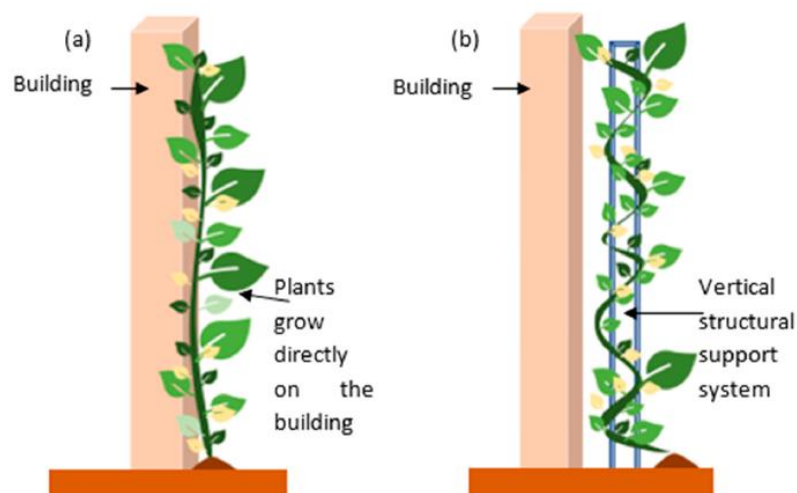
Figura 1 - Tipos de jardins verticais: (a) cortinas verdes; (b) paredes verdes.



Fonte: Safikhani *et al.* (2014).

As cortinas verdes, também conhecidas como “fachadas verdes”, se caracterizam pelo uso de plantas e espécies vegetais com propriedades de aderência em superfícies, as quais podem ser plantadas no solo ou em módulos na base da superfície. Essa tecnologia pode ser separada em dois tipos: o primeiro (a), e mais difundido e utilizado, é o método tradicional, em que a espécie se adere, e cresce diretamente em contato com a superfície. Já o segundo (b) é o método de camada dupla, em que a espécie é plantada de modo a crescer e se aderir em uma trama, ou tela próxima a superfície da estrutura, de modo a deixar um vão, entre a cortina verde e a edificação (Hussain *et al.*, 2020), como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Tipos de cortinas/fachadas verdes: (a) tradicional e (b) camada dupla.



Fonte: Hussain *et al.* (2017).

O sistema de jardim vertical de fachada verde do tipo camada dupla apresenta uma massa de ar, presente no vão entre a trama combinada com a espécie e a superfície da estrutura, que envelopa a edificação, fomentando a eficiência térmica, pois age como um isolante térmico. Essa camada isolante se mostra altamente benéfica nas temporadas de clima com temperatura elevada, como o verão (Wong *et al.*, 2010; Ottelé *et al.*, 2011).

As camadas vegetais formadas pelos jardins verticais possuem um efeito de resfriamento que converte a energia incidente em calor latente (em vez de calor sensível), esse o qual é responsável por realizar a mudança de estado físico sem aumentar a temperatura, sendo todo esse processo ocasionado pela evapotranspiração (Sheweka; Magdy, 2011).

A evapotranspiração é a combinação da evaporação da água presente nas espécies vegetais com a sua transpiração. Essa junção faz com que a energia térmica seja absorvida pelos processos bióticos, uma vez que as plantas perdem água durante esse processo. O efeito de evapotranspiração é o fator principal no resfriamento de uma estrutura revestida com jardins verticais, pois a vegetação desempenha a dissipação da radiação solar, pois grande parte dessa radiação é transformada em calor latente, durante seu processo, e assim reduz a temperatura das superfícies e dos ambientes das edificações (Hussain *et al.*, 2020; Koyama *et al.*, 2013).

Em suma, o efeito de evapotranspiração, garantido pela massa de ar formada entre a fachada verde de dupla camada e a superfície da estrutura perpetua uma propriedade que regula a temperatura do ambiente e melhora o fluxo de vento em torno da edificação (Hussain *et al.*, 2020). A taxa de evapotranspiração é influenciada pela umidade, velocidade do vento, clima local, e acima desses fatores, o tipo de espécie aplicada na fachada verde, visto que cada espécie possui características bióticas diferentes acerca de sua transpiração e evaporação da água presente em seu organismo (Brown, 2014).

Para jardins verticais, como cortinas verdes, são extremamente indicadas espécies de plantas trepadeiras de caráter denso e pesado (conhecidas como “*heavy climbers*”), que possuem um crescimento vigoroso e extenso potencial de cobertura vegetal, como a *Thunbergia grandiflora*, também chamada de tumbérgia-azul ou azulzinha, uma espécie comumente usada em jardins verticais, devido a essas características (Perini; Magliocco, 2012).

A tumbérgia-azul também é conhecida por ser altamente tolerante a níveis nocivos de poluição do ar, além de desempenhar um papel de grande influência na atenuação dos níveis de poluição do ar, características importantes para os sistemas de jardins verticais (Pandey *et al.*, 2016). É comprovada, por meio de estudos científicos, a capacidade da tumbérgia-azul de reduzir a temperatura de ambientes quando utilizada como cobertura vegetal em cortinas verdes. Em frente a condições de ventilação natural, com alta velocidade do ar, a performance térmica de fachadas verdes utilizando essa espécie apresenta reduções na temperatura do ar em ambientes internos, de no máximo 10 °C, e em média 4 °C, aproximadamente, comparando com a temperatura registrada externamente à edificação. Do contrário do que se pode imaginar, a alta densidade de cobertura vegetal que a tumbérgia-azul apresenta não interfere, nem reduz o fluxo de ar e a velocidade do vento quando aplicada em sistemas de jardins verticais (Sunakorn; Yimprayoon, 2011).

Plantas trepadeiras como a tumbérgia-azul, o pepino-doce (*Coccinia grandis*) e o cipó-coral (*Antigonon leptopus*), assim como outras espécies de características semelhantes, são indicadas para aplicação como cobertura vegetal para sistemas de jardins verticais, pois apresentam rápido crescimento, fácil adaptação de solo e alta densidade de área foliar, além de que são nativas de regiões de climas quentes, úmidos, de caráter tropical e sub-tropical – regiões as quais mais necessitam de técnicas de atenuação de elevadas temperaturas que garantem eficiência energética e sustentabilidade (Sunakorn; Yimprayoon, 2011).

Um passo primordial para estruturar e construir sistemas de jardins verticais é a caracterização da(s) espécie(s) utilizada como cobertura vegetal para a fachada verde. Estabelecer as principais propriedades e características físicas e térmicas das espécies, como seu índice de área foliar (LAI – *leaf area index*), emissividade (ϵ), condutividade térmica (λ), calor específico (c), densidade (ρ), energia interna (U) e outras propriedades que apresentem influência no comportamento térmico e na interação entre a fachada verde e o ambiente que a hospeda (Safikhani; Baharvand, 2017; Sunakorn; Yimprayoon, 2011; Zhou *et al.*, 2023).

O maior problema para os estudos, e para a aplicação prática, de sistemas de jardins verticais é a caracterização das espécies, um contexto necessário, uma vez que conhecidas as características do elemento, podendo ser aplicado de forma mais eficiente de acordo com as condições ao seu entorno e como o mesmo irá interagir e influenciar o ambiente. A maior dificuldade encontrada acerca de caracterizar esse tipo de vegetação é decorrente de seu caráter biológico, ou seja, é basicamente um organismo vivo que apresenta uma infinidade de comportamentos e processos bióticos, desde seu crescimento, desenvolvimento, perda e ganho de água, calor e energia, assim como suas condições de plantio, durabilidade e processos fisiológicos internos (Sunakorn; Yimprayoon, 2011).

Os estudos, em sua maior parte, acerca do comportamento e da fisiologia e biologia das espécies utilizadas em cortinas verdes dependeram de estudos empíricos, pesquisas voltadas a monitoração e análise de sistemas de jardins verticais construídos para tal fim. Entretanto, com o advento da tecnologia, diversos estudos surgiram na atualidade com métodos de avaliação e estimativas baseadas em métodos computacionais tanto das características termo físicas, quanto da performance térmica de jardins verticais, que também se baseiam e comparam dados e resultados de estudos empíricos mais tradicionais, resultando em uma base de dados cada vez mais sólida (Zhou *et al.*, 2023).

Para otimizar os processos de análise da performance térmica dos jardins verticais, diversos estudos e pesquisas da atualidade trouxeram a aplicação desses elementos vegetais em *softwares* específicos para trabalhar com as propriedades e efeitos da vegetação em estruturas (Peng, 2009). Dentre os programas computais utilizados na abordagem de performance termoenergética, se destacam o *EnergyPlus* e o *DesignBuilder*, capazes de simular temperatura do ar, temperatura de superfície, ventilação natural, fluxo de ar, velocidade do vento e os processos de troca de calor entre ambientes e exteriores (USD, 2013; Baharvand *et al.*, 2013; Nguyen; Reiter; Rigo, 2014; Dahanayake; Chow, 2017).

Os *softwares* permitem a caracterização dos elementos de vegetação, assim, suas propriedades físico-térmicas podem ser inseridas no programa, de modo a permitir que as análises sejam mais precisas, gerando resultados sólidos em torno da performance térmica dos sistemas de jardins verticais e como eles influenciam os ambientes os quais circundam (Killian; Kozek, 2016).

A utilização de programas como o *EnergyPlus* e o *DesignBuilder* simplificam o processo de estudo e coleta de dados a respeito dos benefícios do uso de sistemas de jardins verticais em estruturas, apresentando, de forma rápida, dinâmica, e direcionada como o conforto térmico é fomentado, por meio da redução da temperatura das superfícies (cobertas pela fachada verde), melhoria no fluxo do ar e na velocidade do vento, aumento nos níveis de umidade, e consequentemente aperfeiçoamento nas condições de vivência do ambiente (Suklje *et al.*, 2019).

Outro fator determinante acerca da aplicação de *softwares* para a simulação de jardins verticais é a dispensa da necessidade de realizar estudos empíricos ou aplicações *in-loco*, os quais demandam tempo e possuem o risco de não obterem sucesso, uma vez que são organismos bióticos suscetíveis a diversos fatores determinantes que podem atrasar ou impedir seu desenvolvimento.

Dessa forma as simulações podem prever, a partir de características conhecidas da estrutura e da espécie escolhida, se o implemento de um jardim vertical realmente pode melhorar o ambiente escolhido, e em caso positivo, também pode avaliar e mesurar o nível dos benefícios garantidos. Assim como, simulações também são úteis para variar as constantes e os fatores, assim como as propriedades, seja da estrutura e/ou da espécie, apresentando um leque de possibilidades e permitindo selecionar as mais eficientes disposições de dimensões, espaçamentos e tipos de plantas para cada caso. (Larsen; Filipín; Lesino, 2015; Hao *et al.*, 2020; García *et al.*, 2022).

1.1. Objetivo Geral

O estudo tem como objetivo o levantamento de características e propriedades físico-térmicas de espécies de plantas trepadeiras utilizadas em sistemas de jardins verticais e de estruturas convencionais de edificações, a fim de produzir ambientes piloto modelados em programas computacionais, e assim, inserir tais dados em *softwares* de simulações termoenergéticas para avaliar a influência dessas propriedades na performance térmica das fachadas verdes.

1.2. Objetivos Específicos

- I. Por meio de uma RSL (revisão sistemática de literatura), realizar um levantamento de espécies de vegetação utilizadas em fachadas verdes que tiveram suas respectivas propriedades térmicas registradas em estudos científicos;

- II. Projetar um ambiente de estudo com características que seguem as normativas técnicas e aplicar nesse mesmo local um sistema de jardim vertical com propriedades parametrizadas;
- III. Desenvolver simulações térmicas com a variação de propriedades do sistema de jardim vertical;
- IV. Comparar os resultados das simulações térmicas e determinar quais as propriedades que exercem maior influência no desempenho térmico de um ambiente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentação das Propriedades

O avanço tecnológico, ao longo dos anos, atingido na atualidade resultou no aperfeiçoamento das tecnologias que fomentam o ambiente de estudo acerca de *softwares* de modelagem e análise de projetos. Tal processo trouxe a expansão dos recursos e metodologias disponíveis para otimizar projetos e pesquisas que visam integrar processos de produção, manipulação, análise e simulações parametrizadas. Ampliar os horizontes da modelagem e simulação com o uso de programas computacionais permite melhorar o fluxo de desenvolvimento, além de prever, executar e avaliar situações reais aplicadas em um contexto digital, para replicar, alterar e analisar de acordo com as informações e dados inseridos, e em uma dinâmica realizada em curtas faixas de tempo, em comparações com aplicações *in-loco* (Junior, 2007; Shadrina, 2015).

A partir desse entendimento, o DesignBuilder constitui uma plataforma computacional de modelagem energética amplamente utilizada para análises termoenergéticas em edificações. Baseado no motor de simulação *EnergyPlus*, o software possibilita a avaliação integrada de variáveis como consumo energético, desempenho de sistemas de climatização, emissões de carbono e conforto térmico. A interface gráfica, aliada à capacidade de modelagem tridimensional, favorece a representação fiel dos ambientes construídos e facilita a aplicação em pesquisas científicas e projetos de eficiência energética (*DesignBuilder*, 2023).

É destaque dentre as funcionalidades do *DesignBuilder*, a possibilidade de caracterização detalhada dos elementos construtivos da edificação. O software permite a atribuição de propriedades térmicas específicas aos materiais dos elementos de modelagem, como a condutividade térmica, calor específico e densidade. Essa configuração possibilita a simulação precisa da dinâmica térmica das construções através das componentes como paredes, coberturas e pisos, viabilizando estudos comparativos entre diferentes soluções construtivas e seu desempenho térmico (*DesignBuilder*, 2023).

O programa incorpora modelos de conforto térmico que seguem as recomendações da norma ASHRAE 55. Acompanhados de indicadores que permitem a avaliação quantitativa do conforto térmico percebido pelos ocupantes, considerando variáveis ambientais e fisiológicas. A inclusão desses modelos torna o *DesignBuilder* uma ferramenta embasada e confiável para estudos de desempenho térmico de materiais e componentes construtivos à percepção térmica dos usuários (*DesignBuilder*, 2023).

A utilização do *DesignBuilder* permite conduzir análises de sensibilidade paramétrica, um recurso essencial para estudos de identificação de parâmetros construtivos com maior impacto sobre o comportamento térmico da edificação. Ao variar sistematicamente propriedades como condutividade, espessura de camadas ou estratégias de ventilação, é possível mensurar o grau de influência de cada variável nos resultados térmicos simulados, contribuindo para a tomada de decisões fundamentadas (Pérez-López *et al.*, 2020).

As estruturas e edificações da construção civil são elementos que interagem com seu entorno, sendo que ambos possuem suas próprias características e propriedades físico-térmicas que dependem um do outro para agir dentro da dinâmica física, térmica e energética. Tais processos dependem, principalmente, dos materiais e suas características, que compõem o conjunto estrutural das construções. Dessa forma, é de suma importância a atenção voltada a analisar, manipular e aplicar materiais com caráter definido em torno desse âmbito (Lamberts, 2010).

A definição precisa das condições ambientais no modelo é essencial, devendo-se incorporar variáveis climáticas externas como temperatura do ar e das superfícies, umidade relativa, radiação solar e ventilação natural. Paralelamente, é necessário quantificar os parâmetros antrópicos, incluindo a densidade de ocupação (valores médios e máximos de usuários), uma vez que a presença humana influencia diretamente os processos de transferência de calor no ambiente devido ao metabolismo corporal e à atividade física. Dessa forma, o *DesignBuilder* apresenta-se como uma ferramenta robusta para estudos que visam a compreensão do desempenho térmico de sistemas construtivos, sobretudo em contextos que envolvem estratégias de mitigação de carga térmica, como fachadas verdes ou soluções passivas. A aplicação do *software* em pesquisas acadêmicas tem contribuído significativamente para o aprimoramento de metodologias de projeto voltadas à eficiência energética e ao conforto térmico em edificações (Limón *et al.*, 2021).

Segundo Lamberts (2010) e Lamberts, Dutra e Pereira (2014), é essencial definir as principais características e propriedades físico-térmicas dos elementos que compõem a estrutura do modelo, sendo elas: resistência térmica (R), condutividade térmica (λ), transmitância térmica (U), calor específico (c), densidade (ρ), permeabilidade (μ), porosidade (ϕ), reflexibilidade (Rf) e emissividade (ε), pois serão os principais fatores determinantes na interação termoenergética do ambiente e dos elementos que compõem a estrutura. Cada propriedade se encontra contextualizada a seguir.

2.1.1. Resistência térmica

Dentro dos conceitos da termodinâmica, a resistência térmica é fundamental para os processos de troca e transferência de calor, mostrando-se como a barreira que um material apresenta diante do fluxo de calor em dois sistemas de temperaturas diferentes, expresso em metro-Kelvin por watts (m^2K/W). Tal conceito é aplicado de forma multidisciplinar, em diversos aspectos físico-térmicos, como na engenharia civil e nos materiais incorporados em elementos construtivos, em que a eficiência térmica é um fator de influência (Incropera; DeWitt, 2011). Tal fator pode ser determinado pelas propriedades dos materiais, como a condutividade térmica, que está diretamente relacionada com o tipo, características, geometria e dimensão dos materiais analisados. O valor da resistência térmica se eleva conforme aumenta a espessura de um material, e, conseqüentemente, diminui sua condutividade térmica (Holman, 2010).

Para aplicações da construção civil, as considerações a respeito da resistência térmica são de fundamental importância, uma vez que são levadas em consideração para determinar estruturas com materiais que possam dissipar o calor e isolar termicamente as edificações, visto que esse é o princípio básico da resistência térmica, dessa forma

garantindo eficiência térmica aos ambientes (Siegel; Howell, 2015). Como padrões sólidos e confiáveis para aferição e verificação de limites definidos de resistência térmica de materiais e sistemas, são estabelecidos métodos dentro de normas técnicas como a ISO 8302 e a ASTM C177.

A concreta compreensão dos processos envolvendo a resistência térmica são importantes para estabelecer conceitos de conforto, performance e eficiência térmica (o), de forma a permitir análise, controle e manipulação das propriedades que influenciam esses fatores.

A resistência térmica, matematicamente apresentada, é definida pela taxa de fluxo de calor (Q) é diretamente proporcional a diferença de temperatura entre dois pontos inversamente proporcionais à resistência térmica do material. A partir desse conceito, é possível analisar e prever a transferência de calor em sistemas que necessitem do controle térmico.

A resistência térmica ($R_{térmica}$) é expressa a partir da Equação 1:

$$R_{térmica} = \frac{\Delta T}{Q} \quad (1)$$

Sendo:

ΔT = diferença de temperatura entre duas superfícies de um material (°C);

Q = taxa de transferência de calor através do material analisado (W).

Por meio da Equação 1, fica explícito que o fluxo de calor apresentado de um material será menor, quanto maior for sua resistência térmica em uma certa diferença de temperatura (Incropera; DeWitt, 2011).

2.1.2. Resistência térmica por condução

Materiais de caráter homogêneo e isotrópico (*e.g.*, aço, compostos de borracha e sólidos amorfos), que possuem as mesmas propriedades mecânicas independente do sentido ou direção, apresentam condução térmica, dessa forma, sua resistência térmica é analisada por meio de condução.

A resistência térmica por condução ($R_{condução}$) é dada pela Equação 2:

$$R_{condução} = \frac{L}{\lambda * A} \quad (2)$$

Sendo:

L = espessura do material analisado (m);

λ = condutividade térmica do material analisado (W/m * K);

A = área de transferência de calor, perpendicular ao fluxo de calor (m²).

A Equação 2 apresenta a adequação da equação geral de resistência térmica, para a dinâmica de condução, para materiais isotrópicos homogêneos, derivada da Lei de Fourier acerca de condução, indicando que a resistência térmica se eleva de acordo com a espessura do material e diminui com o aumento da condutividade e da área do material, apresentando um princípio de dissipação de calor em uma superfície (Fourier, 1822).

2.1.3. Resistência térmica por convecção

Nos casos em que a transferência de calor ocorre por meio de convecção, ou seja, quando o sistema apresenta a presença de materiais líquidos (e.g., água, óleo e outros materiais no mesmo estado) é necessário determinar a resistência térmica por convecção.

A resistência térmica por convecção ($R_{convecção}$) é dada pela Equação 3:

$$R_{convecção} = \frac{1}{h * A} \quad (3)$$

Sendo:

h = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m² * K);

A = área da superfície de transferência de calor (m²).

2.1.4. Resistência térmica em sistemas (análise em série e paralelo)

É essencial a compreensão de que a resistência térmica se comporta de uma maneira diferente diante de elementos compostos, que possuem camadas de materiais diferentes. Tais elementos de múltiplas camadas podem ser analisados na construção civil, como paredes (e.g, pintura, substrato, alvenaria e revestimento), coberturas e telhados (e.g., madeira, metais e isopor), e esquadrias (e.g., aço, plásticos e vidro), assim como qualquer outro material inserido na estrutura das edificações (Incropera; DeWitt, 2011; Siegel; Howell, 2015). Para sistemas em série, ou seja, onde estão dispostas duas ou mais camadas de materiais uma em seguida da outra, existe um valor para a resistência térmica total do sistema, em que o fluxo de calor atravessa cada camada, de forma sequencial, assim definida pela soma das resistências térmicas individuais dos materiais de cada camada (Incropera; DeWitt, 2011; Siegel; Howell, 2015).

Quando é necessário analisar a resistência térmica total (R_{total}), em série, de um elemento com múltiplas camadas, compostas por diferentes materiais, aplica-se a Equação 4:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 + [\dots] + R_n \quad (4)$$

Em sistemas em paralelo, as múltiplas camadas estão dispostas de uma maneira que o fluxo de calor atravessa duas, ou mais, camadas de forma simultânea. Assim, o inverso da resistência térmica total do elemento é definido pela soma dos inversos de cada resistência individual, de cada material (Incropera; DeWitt, 2011; Siegel; Howell, 2015).

Para analisar a resistência térmica total (R_{total}), em paralelo, a Equação 5 deve ser aplicada da seguinte forma:

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + [\dots] + \frac{1}{R_n} \quad (5)$$

Os modelos apresentados permitem que seja realizada uma análise mais aprofundada do fluxo de calor em elementos compostos por várias camadas de materiais diferentes, uma ferramenta extremamente importante para estudar a dinâmica térmica e os processos que envolvem a performance térmica das estruturas térmica (Holman, 2010; Incropera; DeWitt, 2011; Siegel; Howell, 2015).

2.1.5. Condutividade térmica

A condutividade térmica representa uma propriedade fundamental dos materiais da engenharia e arquitetura, essencial para a compreensão dos processos de transferência de calor, sendo a medida da capacidade que um material tem de conduzir calor, importante para analisar as características de isolamento térmico que um material tem. Assim, a condutividade térmica desempenha um papel de grande influência nos processos de condução de calor em elementos sólidos (estruturas), líquidos (água presente na composição dos materiais) e gases (oxigênio), além de extremamente necessário ter seu comportamento compreendido para analisar sistemas de controle de temperatura e isolamento térmico (Incropera; DeWitt, 2007; Cengel; Ghajar, 2015; Kreith; Manglik, 2016).

Os materiais que compõem as estruturas da construção civil, ramo principal da engenharia civil, possuem suas variáveis térmicas registradas em normas (ISO 8302, 1992; ASTM C177, 2021), como é o caso da condutividade térmica (λ), que indica o potencial de quantidade de calor que pode ser transferida através de um material ao longo de um período definido, na condição de uma diferença de temperatura em ambas as extremidades do elemento. Pela equação de Fourier, é possível obter o valor da condutividade térmica, mediante a Equação 6 de condução de calor em estado estacionário, seguindo em um vetor fixo:

$$Q = -\lambda * A * \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Isolando a variável de condutividade térmica λ , a Equação 7 reformulada como:

$$\lambda = - \frac{Q}{A * \frac{dT}{dx}} \quad (7)$$

Sendo:

Q = taxa de transferência de calor (W);

λ = condutividade térmica (W/m*k);

A = área perpendicular ao fluxo de calor (m²);

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura ao longo da direção do fluxo de calor.

Materiais considerados bons condutores de calor apresentam altos valores de λ , com alta condutividade térmica, como é o caso dos metais aço, cobre e latão. O contrário acontece com materiais isolantes, com baixos valores de λ , e baixa condutividade térmica, como o isopor, vidro, lã e o próprio ar. Tais condições são atreladas a estrutura cristalina organizada de materiais altamente condutores, que possuem elétrons livres, já os materiais de baixa condutividade térmica apresentam uma estrutura menos organizada e dificultam a transferência do fluxo de calor (Incropera; DeWitt, 2007; Cengel; Ghajar, 2015; Kreith; Manglik, 2016).

2.1.6. Condutividade térmica para elementos tridimensionais

A grande maioria dos elementos estruturais da construção civil possuem três dimensões (x, y, z), de uma forma em que o fluxo de calor deverá ser distribuído ao longo de um volume. Para determinar o valor de condutividade térmica em uma estrutura tridimensional, a Equação 8 se expande para as três dimensões de x, y e z :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (8)$$

Isolando a variável de condutividade térmica (λ) na Equação 9, uma vez que calculada a difusividade térmica (α), a Equação 10 reformulada se apresenta:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho * c_p} \quad (9)$$

$$\lambda = \alpha * \rho * c_p \quad (10)$$

Sendo:

T = temperatura (°C);

t = tempo (h);

$x; y; z$ = vetores de coordenadas espaciais;

α = difusividade térmica (m²/s);

λ = condutividade térmica (W/m*k);

ρ = densidade do material analisado (kg/m³);

c_p = calor específico (J/°C/kg).

2.1.7. Condutividade térmica em situação de calor transiente

É necessário em certos casos determinar a condutividade térmica ao longo de um determinado período, para análises que considerem uma específica faixa de tempo. Dessa forma, em situações que a temperatura pode variar com o tempo, a Equação 11 de condutividade térmica é utilizada como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha * \nabla^2 T \quad (11)$$

Isolando a variável de condutividade térmica λ na Equação 9, a Equação 12 fica reformulada como:

$$\lambda = \frac{\rho * c_p * \frac{\partial T}{\partial t}}{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}} \quad (12)$$

Sendo:

T = temperatura (°C);

t = tempo (h);

x = vetor de coordenadas espaciais;

α = difusividade térmica (m²/s);

λ = condutividade térmica (W/m*k);

ρ = densidade do material analisado (kg/m³);

c_p = calor específico (J/°C/kg);

$\nabla^2 T$ = operador laplaciano, em relação a T .

Além da composição e do tipo dos materiais, existem dois outros fatores que apresentam grande influência nas propriedades de condutividade térmica dos elementos construtivos, sendo eles: umidade e a temperatura da estrutura analisada. A umidade de um material pode alterar as condições de condutividade térmica devido a presença de água e também de oxigênio dentro de sua composição interna, já a temperatura afeta a condutividade pelo fato de que cada material reage de uma forma diante de variações de temperatura, como dilatação ou retração, que alteram suas dimensões e até mesmo sua composição química ou biológica, quando se tratando de elementos vivos, como vegetação (Monteith; Unsworth, 2013; Incropera; DeWitt, 2007; Cengel; Ghajar, 2015; Kreith; Manglik, 2016).

Muitos materiais apresentam variações em suas propriedades diante de variações de temperatura. Os metais, por exemplo, perdem condutividade térmica ao sofrerem aumento de temperatura, pois seus fônons e elétrons sofrem dispersão, interferindo e reduzindo sua capacidade de transferência de fluxo de calor. Materiais de caráter isolante, com baixa condutividade térmica, ao serem aquecidos, apresentam aumento em sua capacidade de transferência de fluxo de calor, até um certo ponto.

Para analisar esse processo é necessário aplicar a Equação 13:

$$\lambda(T) = \lambda_0 + \alpha * T \quad (13)$$

Sendo:

T = temperatura (°C);

α = difusividade térmica, como uma constante definida (m²/s);

$\lambda(T)$ = condutividade térmica, em função de um valor de temperatura (W/m*k);

λ_0 = condutividade térmica original/natural do material (W/m*k).

Do mesmo jeito que as variações de temperatura, a umidade age na influência da capacidade de transferência de fluxo de calor que um material pode apresentar. Materiais de baixa densidade, com alta presença de poros e vazios, uma vez que esses, úmidos, tem essas lacunas físicas preenchidas por água, que possui um valor de condutividade térmica maior que o do ar (0,60 W/m*K e 0,026 W/m*K, respectivamente), o que é capaz de aumentar significativamente o valor de condutividade térmica de um material (Incropera; DeWitt, 2007; Cengel; Ghajar, 2015; Kreith; Manglik, 2016).

A condutividade térmica, influenciada pela umidade é descrita pela Equação 14:

$$\lambda(h) = \lambda_{seco} + x * h \quad (14)$$

Sendo:

$\lambda(h)$ = condutividade térmica, em função da umidade (W/m*k);

λ_{seco} = condutividade térmica do material em estado seco (W/m*k);

h = umidade do material (%);

x = constante de ajuste para avaliar o impacto da umidade no material.

A partir dessa relação, é possível perceber que o teor de umidade afeta os valores de condutividade térmica dos materiais, uma vez que quanto maior a presença de água, a taxa de transferência de calor se aumenta de forma linear até um certo ponto, apresentando queda na capacidade de bloqueio térmico de materiais isolantes (Incropera; DeWitt, 2007; Cengel; Ghajar, 2015; Kreith; Manglik, 2016).

2.1.8. Transmitância térmica

A transmitância térmica (U) é uma propriedade essencial na avaliação do desempenho termoenergético de uma construção. É definida como a taxa de transferência de calor através de um elemento construtivo, como paredes, janelas e coberturas e expressa a capacidade de um elemento de conduzir o calor. Normalmente confundida com a condutividade térmica (λ), por originarem do mesmo princípio, taxa de transferência e condução de calor de um material. Entretanto, diferem-se no fato que a condutividade se limita apenas a ser a propriedade específica de um material, e a transmitância é a propriedade total do conjunto. Dessa forma, a condutividade térmica é fundamental para o cálculo da transmitância térmica, uma vez que seus valores estarão diretamente aplicados dentro do conjunto, de diversas camadas. Outro fator que ressalta a diferença entre ambas é a unidade de medida que as pertencem, a condutividade é expressa em watts por metro por Kelvin (W/m*K), enquanto a transmitância é dada em watts por metro quadrado por Kelvin (W/m²*K), desse modo fica explícito a relação entre ambas as propriedades (ASHRAE, 2017).

Materiais com baixos valores de transmitância térmica mostram-se como exímios isolantes térmicos, que garantem redução no ganho de calor em situações de elevadas temperaturas, como temporadas de verão em regiões de clima de caráter tropical, subtropical e árido (ASHRAE, 2017). Segundo a NBR 15575, é de grande importância o conhecimento da transmitância térmica para desenvolvimento de contextos construtivos com alta performance termoenergética, para garantir a conformidade com critérios, estabelecidos em norma, de conforto térmico e eficiência energética em ambientes (ABNT, 2013). Assim como, ter a compreensão acerca da transmitância térmica possibilita uma escolha criteriosa e eficiente para materiais e sistemas construtivos que

possam fomentar a sustentabilidade e a amenização do consumo de recursos energéticos para sistemas de climatização (IEA, 2020).

A otimização dos níveis de transmitância térmica dos materiais aplicados na construção civil resulta em significativas reduções de temperatura dos ambientes e, consequentemente, acarretam economias benéficas no consumo de energia elétrica, tornando-se uma propriedade importante para estudos e pesquisas que buscam o desenvolvimento e análise de estruturas sustentáveis e *eco-friendly* (Zhou *et al.*, 2018).

O cálculo da transmitância térmica leva em consideração a resistência térmica de cada camada que compõe o elemento analisado, definido pela Equação 15:

$$U = \frac{1}{R_{total}} \quad (15)$$

De forma que o valor de R_{total} é a resistência térmica total do elemento construtivo, obtido pela Equação 16:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (16)$$

Sendo:

U = transmitância térmica do elemento (W/m²*K);

R = resistência térmica do elemento (m*K/W);

d = espessura do elemento (m);

λ = condutividade térmica do elemento (W/m*K).

Quando é necessário definir a resistência térmica, a fim de determinar o valor de transmitância térmica, em um elemento que possui várias camadas de materiais diferentes, seja em um fluxo de calor por convecção ou condução, é utilizado o valor de R_{total} , de acordo com as condições e equações apresentadas no capítulo que aborda sobre resistência térmica assim tornando-se possível definir o valor de transmitância térmica do elemento construtivo analisado.

Também é possível definir o valor da transmitância térmica de um conjunto a partir do valor da taxa de transferência de calor (Q), de acordo com a Equação 17:

$$Q = U * A * \Delta T \quad (17)$$

Isolando a variável de transmitância térmica U , a Equação 18 é apresentada como:

$$U = \frac{Q}{A * \Delta T} \quad (18)$$

Sendo:

Q = taxa de transferência de calor do elemento (W);

U = transmitância térmica do elemento (W/m²*K);

A = área do elemento (m²)

ΔT = diferença de temperatura entre o interior e a superfície externa do elemento (K).

2.1.9. Calor específico

O calor específico (c) dos materiais é uma propriedade fundamental nos processos da termodinâmica. Essa propriedade apresenta a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa de um material em uma unidade de temperatura. Expresso por joules por grama-Celsius (J/g*°C), é essencial para a determinação de propriedades e do funcionamento de processos térmicos de materiais (Cengel; Boles, 2015).

É importante que o calor específico seja uma característica conhecida para estudos e pesquisas sobre processos térmicos pois apresenta a capacidade de fornecer informações sobre como diferentes materiais se comportam diante de variações de temperatura. Cada material possui um calor específico característico, intrinsecamente dependente de sua estrutura molecular e como suas partículas interagem entre si. Como, por exemplo, a água, que possui, alta condutividade térmica (λ) e alto calor específico (c), tornando-a um excelente condutor de calor, assim como apresenta uma alta condição de absorção e armazenamento de calor (Incropera *et al.*, 2007).

Para sistemas de climatização, que desempenham funções de resfriamento e aquecimento, é essencial ter o parâmetro de calor específico dos materiais, uma vez que essa propriedade define os princípios básicos para avaliação do desempenho térmico e nos processos de fluxo de calor. Assim como, a compreensão do calor específico otimiza pesquisas e estudos que visam analisar áreas de performance térmica e eficiência energética, onde o foco se estabelece no comportamento de sistemas influenciados pelas alterações de temperatura e de cargas térmicas (Young; Freedman, 2012).

Para aferir o calor específico, executam-se experimentos caloríficos que determinam essa propriedade, derivados da Equação 19:

$$Q = m * c * \Delta T \quad (19)$$

Isolando a variável do calor específico c , a Equação 20 reformulada se apresenta em:

$$c = \frac{Q}{m * \Delta T} \quad (20)$$

Sendo:

c = calor específico (J/g*K);

Q = fluxo de calor (J);

m = massa do material (g);

ΔT = variação de temperatura (°C).

2.1.10. Densidade

A densidade (ρ) é uma das propriedades primordiais dentro da física, e em consequência, essencial para as áreas de ciências dos materiais e das engenharias. Definida pela razão entre a massa (m) e o volume (v) de um material, se torna crucial por influenciar os materiais nos mais variados contextos físicos, como seu comportamento diante dos fluidos, das reações mecânicas e dos processos térmicos. É uma propriedade intensiva, que não depende da quantidade de matéria presente, e varia de acordo com pressão e temperatura (Weast, 1984; Houghton *et al.*, 2001; Boeing, 2009).

Definida pela Equação 21, a densidade, pode ser expressa como:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (21)$$

Sendo:

ρ = densidade do elemento (kg/m³);

m = massa do elemento (kg);

v = volume do elemento (m³);

Outro aspecto importante da densidade é a variação de seu valor de acordo com a mudança de pressão e temperatura, como por exemplo na água, que atinge sua densidade máxima aos 4 °C, resultando em comportamentos anômalos em ecossistemas aquáticos, fator de relevância pela água ser o principal elemento a preencher vazios em materiais de caráter poroso, assim mostrando como a densidade pode influenciar a estrutura térmica de acordo com condições específicas. Tal fenômeno é importante na termodinâmica, uma vez que mostra que a densidade não é uma propriedade estática, e sim uma variável complexa de alterações de condições térmicas (Benson, 1984; Cengel; Boles, 2015).

Tal propriedade desempenha um papel crucial em processos térmicos, pois tem influência em como os materiais interagem entre si e com o ambiente que estão inseridos.

Na termodinâmica a densidade é relevante para análise de equilíbrio, mudanças de fases e comportamento dos materiais (Cengel; Boles, 2015). A densidade também modifica os processos de transferência de calor nos sistemas térmicos, pois altera o comportamento dos líquidos, por exemplo, afetando os efeitos de convecção e condução de calor, assim como na difusão de substâncias, especialmente relevante onde existem condições de dependência de sistemas com variação de pressão e temperatura, como em reações e processos de engenharia térmica (Moran; Shapiro, 2014).

A densidade afeta diretamente a condução de calor dos materiais. Na condução de calor a taxa de transferência de calor é determinada pela condutividade térmica (λ) e pela densidade do material, pois materiais mais densos possuem maior condutividade térmica, como metais, que são excelentes condutores térmicos. Já materiais isolantes possuem uma densidade inferior, como isopor, vidro e o ar, que apresentam baixa condutividade térmica, dessa forma apresentando a interligação entre a densidade e a capacidade de conduzir calor (Incropera; DeWitt, 2007).

Nos processos de convecção de calor, a densidade se relaciona com a mecânica dos fluidos. Pois a diferença de densidade entre as camadas do elemento analisado ao sofrerem variações de temperatura desencadeia a movimentação dos fluidos na convecção natural, uma vez que as substâncias aquecidas têm sua densidade reduzida realiza a troca pela substância mais densa, resultando em um ciclo de transferência de calor em função da variação de temperatura, e consequentemente, de densidade (Hodge, 2011).

É importante estabelecer que variações de temperatura também são responsáveis por alterar as dimensões dos elementos, uma vez que, alguns materiais se expandem diante de aumentos de temperatura, o que resulta em redução de sua densidade (Cengel; Boles, 2015).

Dessa forma, a densidade é um propriedade essencial para os processos térmicos, pois interage de forma complexa com a estrutura do material e o ambiente, não somente caracterizando os materiais, mas influenciando o comportamento de sistemas térmicos, fundamental para análises e previsões de dinâmicas térmicas dos elementos e estruturas, desde a condução de calor até a convecção para sistemas mais complexos (Incropera; DeWitt, 2007; Hodge, 2011; Cengel; Boles, 2015; Callister; Rethwisch, 2018).

2.1.11. Porosidade

A porosidade (ϕ) como propriedade de um material afeta uma ampla gama de fenômenos termodinâmicos, é relevante em aplicações de estudos científicos e no âmbito das engenharias. É definida como a fração do volume de um material ocupados por vazios, espaços conhecidos como poros, em relação ao volume total do material. Essa propriedade influencia as propriedades mecânicas, físicas e térmicas de um material, geralmente presente em rochas, plásticos, lãs, solos, polímeros e membranas, desempenhando um papel importante na condução de calor, transferência de massa, substâncias e líquidos, e armazenamento de energia (Brosseau *et al.*, 2001; Bergman *et al.*, 2011).

Diante da dinâmica térmica dos materiais a presença de poros altera a capacidade de guardar e transferir calor ao longo de sua estrutura. Materiais porosos possuem baixa condutividade térmica, quando comparados a materiais mais sólidos, preenchidos pela própria matéria, esse fato está atribuído a resistência térmica do ar, que majoritariamente preenche os vazios. Materiais como espumas metálicas e cerâmicas porosas podem ter sua condutividade térmica manipulada ao controlar a taxa de porosidade de sua estrutura, definindo o volume de vazios no material, permitindo desempenhar um papel de isolamento térmico (Brosseau *et al.*, 2001; Cengel; Ghajar, 2015).

Além disso a porosidade afeta o equilíbrio dos estados físicos e absorção de água e umidade, influenciando a energia interna do sistema, assim tornando-se uma variável essencial para os processos de troca e transferência de calor (Incropera; DeWitt, 2007; Cengel; Ghajar, 2015). A análise da porosidade é complexa, devido ao fato que envolve a interação entre a parte sólida do material com os líquidos e/ou gases que preenchem os vazios, tornando-a uma propriedade de influência nos processos de otimização do desempenho dos materiais porosos nas aplicações de comportamento mecânico e armazenamento e transporte de cargas térmicas (Bear, 1988; Dulien, 2012).

A capacidade térmica de materiais porosos pode ser afetada pela taxa de porosidade do material, uma vez que os vazios reduzem a massa por unidade de volume, diminuindo a capacidade de armazenar calor. Assim como a difusividade térmica, caracterizada pela velocidade com que o calor se espalha em um material, tem seu processo influenciado pela interrupção de matéria que conduz o calor, dificultando o armazenamento e transferência de calor (Incropera; DeWitt, 2007).

2.1.12. Condutividade térmica em materiais porosos

A condutividade térmica em materiais porosos, é estabelecida pela condutividade térmica efetiva (λ_{ef}), a partir da Equação 22 de Maxwell-Eucken (Bear, 1988):

$$\lambda_{ef} = \lambda_f * \frac{2\phi + (1 - \phi) * \frac{\lambda_s}{\lambda_f}}{2 - \phi + (1 - \phi) * \frac{\lambda_s}{\lambda_f}} \quad (22)$$

Sendo:

λ_{ef} = condutividade térmica efetiva (W/m*k);

λ_f = condutividade térmica do fluido, presente nos poros (W/m*k);

λ_s = condutividade térmica do sólido (W/m*k);

ϕ = porosidade do material (%)

A partir da Equação 22, fica evidente que o aumento da porosidade (ϕ) aproxima os valores da condutividade térmica efetiva (λ_{ef}) e condutividade térmica do fluido (λ_f).

Quando os poros são preenchidos pelo ar, de baixa condutividade térmica, o valor de λ_{ef} é reduzido conforme o aumento da porosidade, trazendo um caráter isolante ao elemento (Cengel e Ghajar, 2015).

2.1.13. Difusividade térmica em materiais porosos

A partir da Equação 9, é possível estabelecer uma relação da porosidade com a difusividade térmica de um material. Reformulando a Equação 9 para as condições de difusividade térmica efetiva, tem-se a Equação 23:

$$\alpha_{ef} = \frac{\lambda_{ef}}{\rho_{ef} + c_{p_{ef}}} \quad (23)$$

Pelas definições das variáveis (Bear, 1988; Bergman *et al.*, 2011; Cengel; Ghajar, 2015) é possível estabelecer as Equações 24 e 25:

$$\rho_{ef} = [(1 - \phi) * \rho_s] + (\phi * \rho_f) \quad (24)$$

$$c_{p_{ef}} = [(1 - \phi) * c_{p_s}] + (\phi * c_{p_f}) \quad (25)$$

Sendo:

λ_{ef} = condutividade térmica efetiva (W/m*k);

α_{ef} = difusividade térmica efetiva (m²/s);

ϕ = porosidade do material (%);

ρ = densidade (kg/m³);

ρ_{ef} = densidade efetiva (kg/m³);

ρ_f = densidade do fluido (kg/m³);

ρ_s = densidade do sólido (kg/m³);

c_p = calor específico (J/°C/kg);

$c_{p_{ef}}$ = calor específico efetivo (J/°C/kg);

c_{p_f} = calor específico do fluido (J/°C/kg);

c_{p_s} = calor específico do sólido (J/°C/kg);

De acordo com a relação estabelecidas pelas equações, o aumento da porosidade diminui os valores de calor específico efetivo, conforme os poros ocupam maior parte do volume total do material, assim preenchidos por um fluido de baixa capacidade de calor. Tal efeito é significativo em materiais que possuem sua matriz sólida com alta capacidade de calor comparada ao do fluido (Incropera; DeWitt, 2007).

A determinação da porosidade em materiais é fundamental dentro da termodinâmica, pois a presença desses vazios vai interferir no controle e transferência de calor, assim, pesquisas e estudos são essenciais para fundamentar a análise da estrutura dos poros dos materiais, visando seu impacto em fenômenos termodinâmicos complexos nas áreas da construção, eficiência termoenergética e sustentável (Brosseau *et al.*, 2001).

2.1.14. Permeabilidade

Para a termodinâmica a permeabilidade se mostra um conceito relacionado a transferência de energia e matéria em processos físicos. Dentro do contexto termodinâmico, a permeabilidade está ligada a capacidade de um material permitir a passagem de outras substâncias, matérias e energia ao longo de sua estrutura, sob um gradiente de pressão e temperatura. Tal conceito é o princípio dos estudos que circundam a troca de calor e massa, essenciais para áreas das engenharias e ciências dos materiais, principalmente para processos de difusão, condutividade e transferência térmica, que dependem da permeabilidade (Holman, 2018; Incropera *et al.*, 2017).

A permeabilidade influencia sistemas físicos e térmicos no comportamento de seu estado que busca equilíbrio. Materiais de alta permeabilidade permitem maior velocidade nos processos de troca de calor para regiões de temperaturas opostas/diferentes, acelerando a equalização térmica. Assim, processos de difusão de líquidos em barreiras porosas sofrem interferência da permeabilidade em sua taxa de transferência de massa (Holman, 2018; Incropera *et al.*, 2017).

Em sistemas de condução e convecção para transferência de calor, onde existem materiais com diferentes condutividades térmicas, a permeabilidade irá auxiliar o controle do fluxo de calor dentro do elemento (Cengel; Boles, 2019). Materiais metálicos, permitem uma rápida dissipação de calor, por conta de sua estrutura interna, com elétrons livres que facilitam o fluxo de calor, condição importante para manter níveis seguros de temperatura. Os materiais de caráter isolante, como cerâmica, isopor e vidro (altamente aplicados na construção civil) possuem baixa permeabilidade térmica, que reduz a taxa de condução de calor, e permite o controle de temperatura, essencial em sistemas de isolamento térmico, como alvenarias, esquadrias e coberturas (Holman, 2018).

Nos processos de convecção, a permeabilidade de um fluido influencia a transferência de calor através das correntes convectivas. Na engenharia, as trocas de calor dependem, para sua eficiência e controle, da escolha de materiais que desempenham controle de fluxo de calor, seja para os fins de isolamento ou de condução e dissipação. Dessa forma a interdependência da permeabilidade com a performance térmica se baseia em desenvolver contextos de manipulação e otimização da condução, convecção térmica para um desempenho exímio (Bergman *et al.*, 2017).

Em jardins verticais, como fachadas verdes e paredes verdes, a permeabilidade dos materiais, nos substratos e no revestimento vegetal, afeta diretamente sua capacidade de isolamento. Os sistemas de jardins verticais criam uma barreira térmica, a partir de uma massa de ar, entre a construção e a fachada verde, reduzindo a transferência de calor. Assim a permeabilidade do ar e da água na estrutura do elemento vegetal fomenta o efeito de isolamento térmico, reduzindo a dependência de sistemas de climatização para resfriamento dos ambientes internos das edificações (Sharma *et al.*, 2018).

O conjunto formado pela presença de água e ar nos sistemas de jardins verticais é dado pelo efeito de evapotranspiração, processo ocasionado pela água evaporada da superfície da folhagem e do solo somada a água e umidade gerada pela transpiração dos elementos vegetais. A permeabilidade dos substratos e da espécie vegetal influencia a capacidade de absorção e retenção de água do elemento, e, consequentemente, afetando os processos de evapotranspiração. A água que evapora do jardim vertical resfria as superfícies e reduz a temperatura do ar em torno da edificação onde é apoiada a fachada/parede verde (Niachou *et al.*, 2001).

A umidade é extremamente influenciada pela permeabilidade das espécies de plantas trepadeiras. Estruturas vegetais que permitem altos níveis de passagem de água e ar em seu interior auxiliam o controle de umidade para os ambientes, tornando-se um efeito benéfico para a eficiência térmica das edificações (Ascione *et al.*, 2019). Assim como a reflexibilidade, onde, sistemas de jardins verticais auxiliam a refletir a radiação de luz solar e calor, reduzindo o ganho de temperatura para as superfícies da edificação. Somado ao sombreamento formado pelas fachadas verdes e ao controle de umidade gerado pela evapotranspiração, os sistemas de jardins verticais podem reduzir a temperatura do ar, das superfícies e do ambiente interno dos edifícios, fomentando a eficiência e performance térmica das construções (Niachou *et al.*, 2001; Liu; Zhang, 2014; Ascione *et al.*, 2019).

2.1.15. Reflexibilidade

Conhecida como reflexibilidade, refletância ou capacidade de reflexão, é um conceito relevante da área da termodinâmica atribuída a propriedade de um material, ou de sua superfície, de refletir a radiação térmica, vindoura de fontes como a luz solar ou da iluminação artificial de luminárias. É uma característica importante nos campos da engenharia, arquitetura, e termodinâmica e luminotécnica, já que a reflexão de radiação pode influenciar as condições de temperatura, eficiência térmica e energética (Santamouris, *et al.*, 2017).

A reflexibilidade é importante, principalmente, para situações que lidam com a transferência de fluxo de calor. Um material exposto diretamente a radiação térmica reflete parte da energia e a outra parte é absorvida, transportada e/ou dissipada pela sua estrutura. Superfícies revestidas por colorações claras (branco, bege e cores semelhantes) refletem uma parte maior da radiação solar incidida, o mesmo acontece com metais de superfícies polidas, assim, reduzindo a absorção de calor do material, e consequentemente diminuindo sua temperatura (Djadid *et al.*, 2020).

Ambientes que possuem alta reflexibilidade apresentam melhores condições de performance termoenergética, pois evitam a absorção excessiva de calor vinda da irradiação de luz em suas superfícies. Dessa forma, com um menor índice de absorção de calor, os sistemas de climatização (resfriamento) acabam por trabalhar menos para reduzir as cargas térmicas dos ambientes (Hwang *et al.*, 2017).

2.1.16. Fluxo de calor por radiação

A transferência de calor por radiação é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann (Bergman *et al.*, 2011), relacionando a energia de radiação emitida por um corpo com a sua temperatura, conforme a Equação 26:

$$Q = \varepsilon * \sigma * A * (T^4 - T_s^4) \quad (26)$$

Sendo:

Q = fluxo de calor, por radiação (W);

ε = emissividade de uma superfície (%);

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);

A = área da superfície analisada (m^2);

T = temperatura da superfície analisada (K);

T_s = temperatura do ambiente em torno (K).

Na Equação 26 a reflexibilidade está associada a emissividade, onde superfícies com altamente reflexivas apresentam baixa emissividade, dessa forma, ao refletir a radiação, tais superfícies emitem menos calor, reduzindo a quantidade de calor que atravessa o elemento (Hwang *et al.*, 2017).

2.1.17. Fluxo de calor convectivo por radiação

Para sistemas de transferência de calor por meio de convecção, relacionando a reflexibilidade, pode ser expresso pela Equação 27:

$$Q = h * A * (T - T_{\infty}) \quad (27)$$

Sendo:

Q = fluxo de calor, por convecção (W);

h = coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$);

A = área da superfície do material (m^2);

T = temperatura da superfície analisada (K);

T_{∞} = temperatura do fluido (K).

A radiação refletida considerada nessa equação interfere na temperatura da superfície (T), uma vez que superfícies de alta reflexibilidade, ao refletir a radiação solar, garante um menor ganho de calor ao sistema, quando comparado com superfícies com menos reflexibilidade. Diante da equação 27, o fluxo de calor (Q) pode ser reduzido ao aumentar o coeficiente de reflexibilidade das superfícies de um ambiente, assim garantindo um ambiente com clima mais ameno (Santamouris *et al.*, 2017).

A reflexibilidade dos jardins verticais, definida pelos substratos, telas, malhas metálicas e, principalmente, pela área e densidade foliar das espécies influencia diretamente na eficiência térmica dos ambientes. Particularmente mais intenso em regiões de climas mais intensos, com altas temperaturas, onde ocorre a redução do calor absorvido, originário da radiação solar, ocasionando a redução do ganho térmico das edificações (Santoamouris *et al.*, 2017).

A evapotranspiração também é afetada pelo nível de reflexibilidade das superfícies das espécies utilizadas nas cortinas verdes. Altos níveis de reflexibilidade, tanto da área foliar, quanto das superfícies em torno do jardim vertical auxiliam no processo de evapotranspiração pois reduzem as cargas térmicas absorvidas e armazenadas pelo sistema, dando assim espaço para o resfriamento dos ambientes, do ar, assim como garantem melhor condições de níveis saudáveis de umidade (Ascione *et al.*, 2019).

O fator principal dos jardins verticais envolvendo a reflexibilidade, é a sua interação com a emissividade da folhagem das cortinas verdes. A intensidade da reflexibilidade é inversamente proporcional a intensidade da emissividade, ou seja, altos níveis da capacidade de refletir a radiação térmica são atrelados a baixa emissividade das superfícies. Assim, decorrente de menor calor radiante, e maior reflexão de radiação solar, é garantida eficiência termoenergética por meio dos sistemas de jardins verticais (Bianchini; Hewage, 2012).

2.1.18. Emissividade

A emissividade (ϵ) é uma propriedade definida pela capacidade de uma superfície de emitir energia térmica em forma de radiação, ligado de forma intrínseca a temperatura do material assim como a suas características físicas e térmicas. A emissividade influencia diretamente a transferência de calor por radiação das superfícies do material com o ambiente. Caracterizar a emissividade é fundamental para a compreensão das aplicações de contextos térmicos dentro das engenharias e da ciência dos materiais, para fins de performance térmica e manipulação do fluxo de calor (Incropera *et al.*, 2008; Modest, 2013). Baseado na concepção de um modelo, com emissividade absoluta, no valor de 1, que emite o máximo de radiação possível, em uma determinada temperatura, de acordo

com a Lei de Stefan-Boltzmann (Bergman *et al.*, 2011). Entretanto, para superfícies reais, os valores de emissividade variam de 0 até 1, e são classificadas de acordo com suas propriedades e capacidade de irradiar calor. A rugosidade, a composição da estrutura interna e a temperatura de um determinado material podem influenciar em como a emissividade varia, assim tornando seu processo de determinação seja complexo, e ao mesmo tempo crucial para analisar sistemas térmicos (Siegel e Howell, 2002; Howell *et al.*, 2010).

Pela Lei de Stefan-Boltzmann (Bergman *et al.*, 2011) é estabelecido o parâmetro que afeta a taxa de transferência de calor por radiação conforme a Equação 28:

$$E = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (28)$$

Isolando a variável de da emissividade ε , a Equação 29 se apresenta em:

$$\varepsilon = \frac{E}{\sigma * T^4} \quad (29)$$

Sendo:

E = emissividade de radiação térmica do material (W/m^2);

ε = emissividade do material (constante de 0 a 1);

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 * 10^{-8} W/m^2 K^4$);

T = temperatura absoluta do material (K).

Na relação apresentada pelas equações 28 e 29, em uma temperatura fixa, a taxa de radiação térmica emitida em um material depende do valor de sua emissividade. Quanto mais o valor da emissividade de um material se aproximar de 1, mais eficiente esse material é para emitir radiação (Modest, 2013).

É importante estabelecer a relação da emissividade com a absorptividade e a reflexibilidade de um material, como em superfícies de caráter opaco, conforme a Equação 30:

$$\varepsilon + \rho + \alpha = 1 \quad (30)$$

A partir da equação 30 é exposto que um material de baixa emissividade, terá alta reflexibilidade, sendo propriedades inversamente proporcionais, e assim reduzindo sua capacidade de absorver, armazenar e transferir cargas térmicas. Essa equação apresenta-se como um fator crucial para analisar o comportamento térmico de revestimentos para finalidade de isolamento ou transferência térmica (Siegel; Howell, 2002).

Altos índices de emissividade em são encontrados em sistemas de jardins verticais, decorrente do fato que a área foliar possui um valor em média de 0,9. Tal valor, extremamente próximo ao máximo, de 1, assim, são capazes de dissipar calor com uma velocidade maior. Durante o dia as fachadas verdes absorvem radiação solar (parte que não foi barrada pela reflexibilidade) e armazenam-na para ser utilizada em seus processos bióticos, de forma a reduzir a quantidade de calor transmitido ao ambiente (Wong *et al.*, 2010).

As cargas térmicas absorvidas, originárias da radiação solar, são aplicadas nos processos biológicos internos das espécies vegetais dos sistemas vegetais, como a fotossíntese e a evapotranspiração, permitindo a esse mecanismo contribuir para a redução da temperatura do ar. Dessa forma, altos níveis de reflexibilidade da densidade foliar garante redução nos níveis de temperatura das superfícies, e ao mesmo tempo, em um caso inverso, com altos níveis de emissividade pela superfície da fachada verde, onde há maior absorção de calor, tal carga térmica será aplicada em processos bióticos, como a evapotranspiração, que serve como amenizador de temperatura do ar. A somatória dessas características reforça a capacidade característica que os sistemas de jardins verticais possuem, fomentando as condições de performance térmica no contexto qual estão inseridos (Pérez *et al.*, 2014).

2.2. RSL (Revisão Sistemática de Literatura)

De modo a alimentar a base de dados que serve de mecanismo principal para as simulações e análises termoeenergéticas desempenhadas pelo *EnergyPlus*, é importante caracterizar a estrutura do modelo piloto – considerado como objetivo de estudo – e, acima disso, a espécie vegetal utilizada na cortina verde.

As propriedades dos jardins verticais são requeridas para serem aplicada nos modelos, características como condutividade térmica, emissividade e coeficientes térmicos similares (Suklje; Medved; Arkar, 2016). Majoritariamente, as respostas térmicas das espécies vegetais são baseadas em estudos empíricos e pesquisas experimentais que coletam dados referentes a esse tipo de propriedades, decorrente da complexidade que circunda a dinâmica da fisiologia das plantas (Suklje *et al.*, 2019).

Como os estudos experimentais e análises empíricas são a principal base de informações sobre espécies utilizadas em jardins verticais – que apresentam propriedades físicas e térmicas, lidando com a dinâmica da fisiologia das plantas – várias metodologias analíticas foram desenvolvidas com o advento da tecnologia. Apresentando uma abordagem mais rápida, dinâmica e precisa em relação a estudos térmicos com sistemas de jardins verticais (Suklje; Medved; Arkar, 2015).

Diante desse contexto acadêmico e científico, é importante desenvolver uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) a fim de catalogar e categorizar pesquisas e estudos, com foco em artigos científicos, para estabelecer uma base de dados com informações das espécies utilizadas em sistemas de jardins verticais de modo a garantir material necessário para alimentar, tanto o *software* utilizado na presente tese, como gerar uma referência para futuros estudos, com outros programas computacionais, de outro autores.

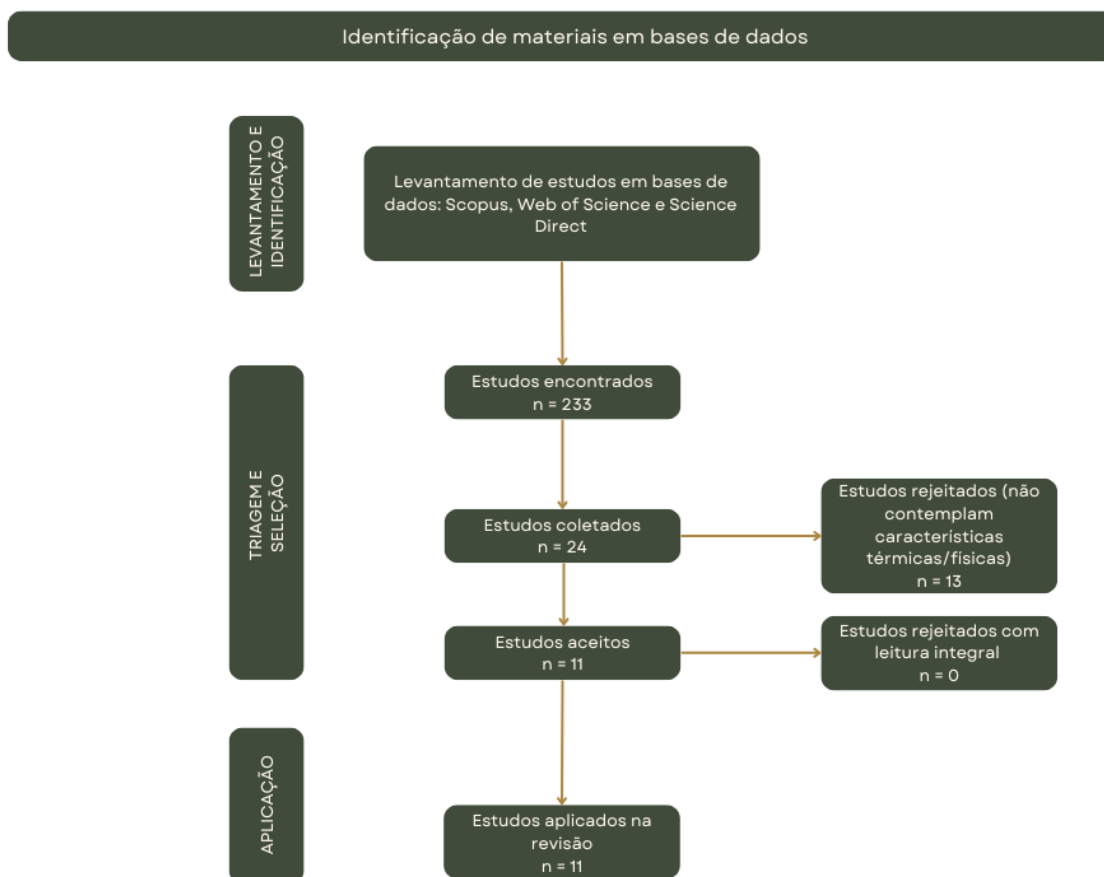
Na presente pesquisa, a metodologia da RSL tem o objetivo de determinar o fator central da pesquisa, criando um meio de coleta e organização de informações essenciais para o estudo abordado. Tornou-se necessário desenvolver uma RSL com diretrizes e protocolos estabelecidos pela literatura, determinando objetivos, planejamento, pesquisa de bibliografia, extração de dados, avaliação de dados e sintetização de estudos para a revisão (Okoli, 2015).

Segundo o protocolo estabelecido, o objetivo da RSL definiu-se por buscar artigos que caracterizem as propriedades físicas e térmicas de espécies vegetais utilizadas em sistemas de jardins verticais. Em sequência, o planejamento da RSL, baseado na busca de artigos e estudos em bases científicas que podem retornar material nesse campo.

Foram escolhidas três bases de dados, sendo elas: Scopus, Web of Science e Science Direct, e definida a *string* de pesquisa com os termos “*green*”, “*facade*”, “*thermal*”, “*physical*” e “*properties*”, para os campos “título/resumo/palavras-chaves”, a fim de cruzar e retornar os artigos indexados que contenham os termos conformes aos objetivos. Além disso, definido um período de busca nos últimos 20 anos, visando levantar um material científico mais atualizado, mesmo que, a pesquisa em torno de propriedades fisiotérmicas de fachadas verdes seja um tópico atual de pesquisa. De forma seguinte, a aplicação da seleção prática, como uma seleção dos artigos que atendiam o protocolo e o objetivo definido, excluindo resultados que ficaram de fora das diretrizes (Okoli, 2015).

Com os estudos coletados nesse processo de levantamento foi feita uma triagem buscando artigos que apresentassem características térmicas e físicas essenciais para a alimentação da base de dados do *software* de análise (Figura 3).

Figura 3 - Fluxograma do método de pesquisa da RSL.



Fonte: Autor, 2024.

O fluxograma PRISMA indicado na Figura 3 apresenta o processo de prospecção das bases de artigo. Nas bases selecionadas para a RSL, foram encontrados 233 artigos que atendiam as *strings* aplicadas nos mecanismos de pesquisa. Desse total, foram coletados 24 artigos, os quais apresentavam em seus conteúdos, como títulos, resumos e palavras-chaves, os termos de “fachadas verdes”, “propriedades térmicas”, “performance térmica” e similares, que apresentam material condizente a abordagem da RSL. Entretanto, a partir de uma leitura integral aplicada nesses artigos selecionados, apenas 11 realmente abordavam e registravam características termo físicas de relevância para a análise computacional de performance térmica de cortinas verdes. Esses 11 artigos que passaram por esse processo de triagem foram aplicados em uma série de tabelas de RSL com funções distintas.

A compilação dos estudos selecionados foi disposta em forma de uma tabela de revisão sistemática de literatura. A Tabela 1, definida como os parâmetros de pesquisa, apresenta as bases de dados as quais foram selecionadas para servir de ferramenta de levantamento dos estudos para a revisão, assim como a faixa de tempo estabelecida para os estudos, sua condição de acesso e as *strings* aplicadas. Por fim, foram exibidos também na tabela o número de artigos resultantes, totais, aceitos e rejeitados.

Tabela 1 - Tabela de parâmetros e resultados de pesquisa.

Base de dados	Acesso	Período	<i>string</i>	Nº de resultados total	Nº de artigos aceitos	Nº de artigos rejeitados
<i>Scopus</i>	Livre	20 anos	<i>green facades and thermal properties</i>	82	6	76
<i>Web of Science</i>	Livre	20 anos	<i>green facades and thermal properties</i>	89	0	89
<i>Science Direct</i>	Livre	20 anos	<i>green facades and thermal properties</i>	62	5	57

Fonte: Autor, 2024.

A Tabela 1 categoriza a pesquisa da RSL e classifica os dados obtidos, onde nas três bases de dados, todos os estudos resultantes são de acesso livre (*open access*), dentro do período dos últimos 20 anos, e seguindo as *strings* de “*green facades and thermal properties*”. Na base *Scopus*, foram encontrados 82 estudos dentro desses parâmetros, mas apenas 6 deles apresentavam características termo físicas aplicáveis nos *softwares* de análise de performance térmica. Na base *ScienceDirect*, o mesmo processo foi reproduzindo, resultando 62 estudos, e 5 foram elegíveis, e na base *Web of Science*, 89 artigos retornaram no mecanismo de pesquisa, entretanto, nenhum deles apresentavam as informações requeridas.

Em seguida, tabela 2 de RSL foi realizada, a partir dos estudos que forma aceitos. Sua classificação se dividiu pelo nome dos autores, o ano de publicação, a região da instituição e dos autores principais, assim como a respectiva base de dados da qual foram encontrados.

Tabela 2 - Tabela de classificação dos estudos aceitos: dados básicos.

Autores	Ano	Região	Base de Dados
Oliveri; Oliveri; Neila	2014	Espanha	<i>Science Direct</i>
Sudimac <i>et al.</i>	2019	Sérvia	<i>Scopus</i>
Capener; Sikander	2015	Suécia	<i>Scopus</i>
Vo; Nichersu; Wendel	2019	Alemanha	<i>Scopus</i>
Suklje <i>et al.</i>	2019	Eslovênia	<i>Scopus</i>
Larsen; Filippin; Lesino	2015	Argentina	<i>Scopus</i>
Perini; Ottelé	2014	Itália	<i>Scopus</i>
Shuhaimi <i>et al.</i>	2022	Malásia	<i>Science Direct</i>
Abdeen; Rafaat	2024	Egito	<i>Science Direct</i>
Zhou <i>et al.</i>	2023	China	<i>Science Direct</i>
Perera <i>et al.</i>	2021	Sri Lanka	<i>Science Direct</i>

Fonte: Autor, 2024.

Na Tabela 3, foi demonstrada a caracterização das espécies, dividida em três segmentos, que contém os principais, e mais importantes, dados das análises de performance térmica, assim como os nomes das espécies de plantas utilizadas nos respectivos jardins verticais, além de também classificar o método de estudo da pesquisa, sendo experimental ou simulação, ou ambos em conjunto, e artigos de revisão de literatura.

Tabela 3 - Tabela de caracterização das espécies dos jardins verticais:, espécies, tipo de estudo e dimensões.

Autores	Nome científico da espécie	Tipo de estudo	IAF	d (m)	L (m)
Oliveri; Oliveri; Neila	<i>Sedum</i> sp.	Experimental	3,24	0,16	0,80
Sudimac <i>et al.</i>	<i>Geranium macrorrhizum</i>	Experimental	1,08	-	0,40
Capener; Sikander	<i>Hedera helix</i>	Experimental e Simulação	-	0,20	0,10
Vo; Nichersu; Wendel	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	Experimental e Simulação	3,00	0,40	0,00
Suklje <i>et al.</i>	<i>Phaseolus vulgaris</i>	Simulação	3,00	0,01	0,08
Larsen; Filippin; Lesino	-	Simulação	2,00	0,25	-
Perini; Ottelé	-	Revisão	-	0,16	-
Shuhaimi <i>et al.</i>	-	Revisão	-	0,05	0,05
Abdeen; Rafaat	<i>Hedera helix</i>	Simulação	5,00	0,20	0,60
Zhou <i>et al.</i>	-	Simulação	3,40	0,40	0,10
Perera <i>et al.</i>	<i>Anxonopus fissifolius</i>	Simulação	3,20	0,20	0,15

Legenda: IAF: = índice de área foliar (m^2/m^2); d = espessura de camada vegetal (m); L = distância do jardim vertical da superfície analisada (m).

Fonte: Autor, 2024.

Pela Tabela 3 foram exibidas as espécies que cada autor utilizou em seus estudos, aqueles que não possuem informações específicas sobre a espécie utilizada, se referem ao jardim vertical como apoio a um “modelo genérico” de fachada verde, ou seja, não se atentando de fato a espécie, e determinando um conjunto geral de propriedades físicas e dimensões de projeto para seus estudos, baseados na literatura.

Além disso, foram categorizados os tipos de estudos desenvolvidos nos artigos, se respaldando em metodologias experimentais, de simulação e revisão. As propriedades físicas apresentadas são, respectivamente, a IAF (índice de área foliar), a variável d, referente a espessura da massa vegetal formada pela espécie, e o L, que representa a distância da fachada verde da estrutura da edificação. A coluna que apresenta um valor de 0 em L, indica um sistema de jardim vertical fixado diretamente na superfície da edificação.

O índice de área foliar é uma medida que representa a quantidade de área de vegetação de uma espécie de planta por uma unidade de área de solo, ou substrato. É

definido pela razão entre a área total das folhas da cobertura vegetal e a área de superfície que a vegetação cobre, sendo uma variável adimensional, pois é expresso em metros quadrados de folhagem por metros quadrados de superfície, sendo m^2/m^2 (Monteith; Unsworth, 2013; Ross, 1981).

Na Tabela 4 são apresentadas as propriedades térmicas registradas pelos autores em cada um dos estudos.

Tabela 4 - Tabela de caracterização das espécies dos jardins verticais: propriedades térmicas.

Autores	Nome científico da espécie	R (mK/W)	λ (W/mK)	U (W/m ² K)	c (J/gK)
Oliveri; Oliveri; Neila	<i>Sedum</i> sp.	0,13	0,19	0,66	-
Sudimac <i>et al.</i>	<i>Geranium macrorrhizum</i>	-	-	0,38	-
Capener; Sikander	<i>Hedera helix</i>	-	0,20	0,21	-
Vo; Nichersu; Wendel	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	0,25	-	-	0,20
Suklje <i>et al.</i>	<i>Phaseolus vulgaris</i>	-	1,10	0,20	0,88
Larsen; Filippin; Lesino	-	0,15	2,00	0,20	4,18
Perini; Ottelé	-	0,09	7,80	2,90	-
Shuhaimi <i>et al.</i>	-	0,60	-	1,66	-
Abdeen; Rafaat	<i>Hedera helix</i>	-	0,36	-	2,80
Zhou <i>et al.</i>	-	-	4,40	-	7,17
Perera <i>et al.</i>	<i>Anxonopus fissifolius</i>	-	-	-	-

Legenda: R = resistência térmica do jardim vertical (mK/W); λ = condutividade térmica do material analisado (W/mK); U = transmitância térmica do jardim vertical (W/m²K); c = calor específico da cobertura vegetal (J/gK).

Fonte: Autor, 2024.

Na Tabela 5 se encontram as propriedades físicas registradas pelos autores em cada um dos estudos.

Os estudos que foram excluídos, rejeitados no processo de levantamento de dados da RSL (Figura 3) não apresentavam características térmicas e/ou físicas sobre as espécies de vegetação utilizadas nos jardins verticais analisados nas pesquisas dos autores. Esses artigos retornaram como resultados no mecanismo de busca das bases de dados devido ao fato de possuírem, em seu conteúdo, termos relacionado as *strings* aplicadas na busca, entretanto, por não apresentarem as informações estabelecidas como prioritárias na RSL, foram descartados e não aplicados no estudo.

Tabela 5 - Tabela de caracterização das espécies dos jardins verticais: propriedades térmicas.

Autores	Nome científico da espécie	ρ (g/m³)	ϕ	μ	R_f	ε
Oliveri; Oliveri; Neila	<i>Sedum sp.</i>	-	-	-	0,30	-
Sudimac <i>et al.</i>	<i>Geranium macrorrhizum</i>	-	-	-	-	-
Capener; Sikander	<i>Hedera helix</i>	1500	0,50	5,00	-	-
Vo; Nichersu; Wendel	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	400	0,00	-	0,70	0,90
Suklje <i>et al.</i>	<i>Phaseolus vulgaris</i>	1800	-	-	0,23	0,98
Larsen; Filippin; Lesino	-	1000	-	-	0,05	0,95
Perini; Ottelé	-	-	-	-	-	-
Shuhaimi <i>et al.</i>	-	-	-	-	-	-
Abdeen; Rafaat	<i>Hedera helix</i>	300	0,30	-	-	0,90
Zhou <i>et al.</i>	-	6100	-	-	-	0,98
Perera <i>et al.</i>	<i>Anxonopus fissifolius</i>	-	-	-	0,70	0,95

Legenda: ρ = densidade da cobertura vegetal (g/m³); ϕ = porosidade da cobertura vegetal; μ = permeabilidade da cobertura vegetal; R_f = reflexibilidade da cobertura vegetal; ε = emissividade.

Fonte: Autor, 2024.

Baseado nas informações levantadas pela RSL, ficou nítido como é escassa a caracterização físico-térmica das espécies vegetais utilizadas em jardins verticais, visto que de 233 artigos que tratam sobre performance térmica com cortinas verdes, aproximadamente 5% desse volume total de estudos realmente trazem dados acerca das propriedades pesquisadas. Além disso, dos 11 artigos aceitos na RSL, 4 deles não definiram uma espécie para os respectivos estudos, apenas definindo um “modelo genérico de fachada verde”, assim perdendo o caráter científico específico para o viés de pesquisa em torno de caracterização de sistemas de jardins verticais.

Os estudos desenvolvidos por Olivieri *et al* (2014) buscavam analisar o efeito de coberturas vegetais, formadas pelo conjunto de plantas e substratos, na performance termoenergética de uma fachada isolada em condições da estação de verão. Para atingir os resultados esperados, o autor desempenhou dois experimentos, com módulos semelhantes, em dimensões e composição, apenas diferindo que a fachada sul, possuía a cobertura vegetal para análise. Apesar de altos índice de resistência térmica nas edificações, a cobertura vegetal apresenta efeito positivo no contexto de estratégias de resfriamento passivo, ocasionado por sistemas de jardins verticais, principalmente nos períodos mais quentes do dia. Estudos realizados com a análise da diferença das superfícies internas e externas de edificações apontam, onde o primeiro caso apresenta valores inferiores em aproximadamente 5 °C. Assim como, os módulos que hospedam sistemas com vegetação possuem uma temperatura do ar relativamente menor, em cerca de 4 °C de diferença (Olivieri *et al.*, 2014).

A análise do fluxo do calor registrada por Olivieri *et al* (2014) indica que as fachadas revestidas com vegetação apresentam uma dinâmica térmica de um resfriamento progressivo, onde o fluxo de calor que é expelido pela superfície, é maior que o fluxo de calor que entra e é absorvido por ela. A pesquisa do autor apresentou características térmicas da fachada com cobertura vegetal (Figura 4) com valores para a resistência térmica (R) de 0,13 mK/W, transmitância térmica (U) de 0,66 W/m²K e condutividade térmica (λ) de 0,19 W/mK. O sistema de jardim vertical foi baseado na espécie *Sedum* sp., um gênero de plantas suculentas com folhas grossas e de alta adaptação para ambientes secos e de baixa umidade, popularmente conhecidos como bálsamos. Nesse estudo não foi apresentado o nome ou espécie específica utilizada, mas o módulo foi caracterizado com um IAF de 3,14, a espessura da vegetação (d) com aproximadamente 16 cm e com uma distância (L) de 80 cm da superfície da edificação.

Figura 4 - Cobertura vegetal de *Sedum* sp.



Fonte: Olivieri *et al.* (2014).

Segundo Sudimac *et al* (2019), fachadas de edificações com revestimentos vegetais influenciam, de forma significativa o equilíbrio térmico do ambiente onde se encontram. Sua pesquisa buscou determinar a contribuição de paredes com vegetação para aperfeiçoar as propriedades energéticas pela experimentação e do modelo proposto. O estudo analisou a especificidade energética acerca da cobertura vegetal, e sua capacidade de contribuição para as propriedades térmicas da edificação. Para determinações científicas, foi elaborado um modelo experimental com propriedades térmicas de influência para o sistema analisado.

As aferições de Sudimac *et al* (2019) mostraram como a dinâmica térmica do ambiente é afetada pelos revestimentos vegetais nas paredes das edificações, devido ao fato da alteração dos coeficientes e valores de transferência de calor ocasionada pelo sistema de cobertura com plantas. Sua metodologia consistiu na análise das propriedades climáticas estabelecidas para o ambiente e das propriedades térmicas do modelo experimental, indicando que as vegetações, usadas como revestimento para a edificação,

reduzem o fluxo de calor para o interior do ambiente, assim como sua capacidade de absorver e armazenar calor.

A utilização da espécie *Geranium macrorrhizum* para sistemas de jardins verticais (Figura 5) se apresenta benéfico para o equilíbrio térmico das edificações, utilizada como uma cobertura vegetal, apresenta valores de transmitância térmica (U) de $0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$, com um módulo caracterizado com um IAF de 1,08, com aproximadamente 40 cm de distância (L) da superfície da edificação (Sudimac *et al.*, 2019).

Figura 5 - Cobertura vegetal com a espécie *Geranium macrorrhizum*.



Fonte: Sudimac *et al.* (2019).

Foi estabelecido por Capener e Sikander (2015), em sua pesquisa de revestimentos vegetais o estudo de módulos de sistemas de jardins verticais em fachadas para uma análise comparativa com fachadas comuns, sem coberturas vegetais. Os estudos experimentais consistiram no monitoramento contínuo das condições hidrotérmicas de ambas as fachadas, ao longo do período de um ano. O experimento dos autores permitiu a avaliação e quantificação das propriedades térmicas das fachadas, mostrando-se um artigo de destaque no meio científico para o âmbito de caracterização de espécies trepadeiras e fomento de pesquisas de jardins verticais.

Quando comparadas com fachadas convencionais de estruturas, fachadas verdes possuem um efeito direto de equalização de temperatura, ou seja, de alcance de equilíbrio térmico para o ambiente. Essa equalização de temperatura está fortemente ligada aos valores de massa térmica apresentados pelas espécies de coberturas vegetais, assim como influencia a umidade relativa da estrutura. Essa mesma dinâmica térmica, de equilíbrio, e de influência nas condições de umidade, pode ser vista em estudos com telhados verdes. O conjunto de efeitos garantidos pela massa térmica, pelo processo de evapotranspiração das espécies, a massa de ar formada entre a fachada verde e a estrutura e o sombreamento do jardim vertical ocasionam uma redução nas flutuações da temperatura do ambiente (Capener; Sikander, 2015).

Em conjunto com o módulo experimental físico desenvolvido por Capener e Sikander (2015), os autores também aplicaram estudos analíticos de comparação com um módulo simulado por *software*, essa dinâmica permitiu estabelecer propriedades térmicas e físicas da espécie *Hedera Helix* (Figura 6), utilizada como parte chave da pesquisa, com valores de condutividade térmica (λ) de 0,20 W/mK, transmitância térmica (U) de 0,21 W/m²K, densidade (ρ) de 1500 g/m³, e porosidade (ϕ) e permeabilidade (μ) de 0,50 e 5,0, respectivamente. O modelo considerava uma espessura (d) de 20 cm para a cobertura vegetal e uma distância (L) de 10 cm entre a superfície da edificação a fachada verde.

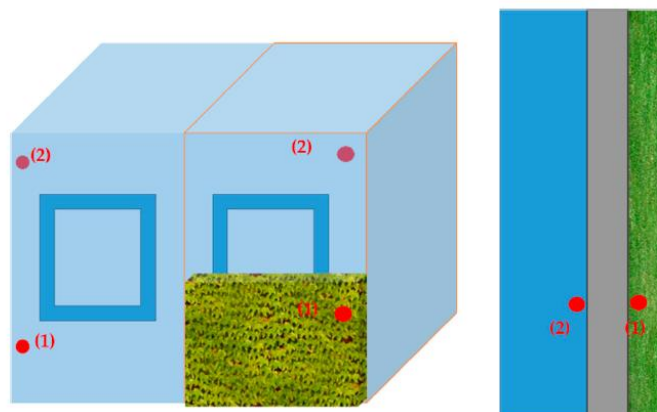
Figura 6 - Cobertura vegetal com a espécie *Hederaelix* sp.



Fonte: Capener; Sikander (2015).

A pesquisa de Vo *et al.* (2019) visava a validar dados empíricos coletados por meio de sensores com um modelo desenvolvido em *software* de acesso aberto, por meio de modelagem e monitoramento de sistemas de jardins verticais, como fachadas verdes e telhados verdes (Figura 7). Os autores tinham por objetivo investigar e quantificar o papel das coberturas vegetais diante do comportamento térmico e da eficiência energética das edificações. A partir da simulação computacional, foi possível definir os coeficientes de transferência de calor do ambiente, assim como as condições térmicas da folhagem, permitindo ao modelo digital analisar a influência térmica da cobertura vegetal e de suas camadas, diante dos ganhos de calor da radiação solar. A análise desenvolvida pelos autores definiu os impactos térmicos do ambiente diante da performance e das características das camadas vegetais.

Figura 7 - Esquemática do modelo de análise, com o posicionamento dos sensores, (1) na camada vegetal e (2) nas superfícies da estrutura.



Fonte: Vo *et al.* (2019).

O paralelo analítico desenvolvido por Vo *et al.* (2019) permitiu que os autores estabelecessem importantes características físicas e térmicas da espécie *Parthenocissus tricuspidata*, quando aplicada como fachada verde, como sua resistência térmica (R), de 0,25 mK/W e calor específico (c) de 0,20 J/gK, assim como características físicas, como a densidade (ρ) de 400 g/m³, reflexibilidade (R_f) e emissividade (ε) de 0,70 e 0,90, respectivamente. O modelo considerou uma espessura (d) de 40 cm para a cobertura vegetal e uma fixação direta da fachada verde na superfície da edificação, com um IAF de 3,00. Dados importantes, visto que a *Parthenocissus tricuspidata*, popularmente conhecida como hera-japonesa ou falsa vinha, é uma espécie de planta trepadeira amplamente utilizada em sistemas de jardins verticais (Figura 8), decorrente de suas altas capacidades de adaptação, crescimento e fixação, além de ser encontrada em várias regiões do planeta.

Figura 8 - Cobertura vegetal com a espécie *Parthenocissus tricuspidata*.



Fonte: Vo *et al.* (2019).

Nos estudos conduzidos por Suklje *et al* (2019), os autores estabeleceram um sistema de jardim vertical, mais precisamente, uma fachada verde, modelada como uma camada homogênea, e a partir de uma modelagem inversa algorítmica foram definidas as propriedades termofísicas dessa camada proposta, seu comportamento térmico pôde ser modelado utilizando uma equação de difusão de calor. O objetivo da pesquisa buscava aplicar a modelagem inversa do sistema de jardim vertical em prol da caracterização térmica da camada homogênea proposta, de forma a otimizar o levantamento de propriedades térmica, calibrando o modelo inverso a partir de dados detalhados da resposta térmica do sistema de jardim vertical. Seus resultados apresentaram uma variação térmica no modelo em torno de 1,3 °C, e um fluxo de calor interno do ambiente estudado em cerca de 0,3 W/m².

O crescimento do interesse científico nos sistemas de jardins verticais e de sua complexidade fomenta a simplificação e otimização dos modelos de análise de suas propriedades termofísicas. Modelos que atingem esse grau de refinamento permitem uma integração cada vez mais natural e fluida com *softwares* de simulação, como *EnergyPlus*, *Revit*, *TRNSYS*, *DesignBuilder*, permitindo maior compreensão do comportamento e do impacto dos sistemas de jardins verticais (Suklje *et al*, 2019).

O modelo algorítmico inverso desenvolvido por Suklje *et al* (2019) permitiu que os autores definissem importantes características termofísicas da espécie *Phaseolus vulgaris*, conhecida popularmente como a vagem ou feijão-vagem, como sua condutividade térmica (λ) de 1,10 W/mK, transmitância térmica (U) de 0,20 W/m²K, calor específico (c) de 0,88 J/gK, densidade (ρ) de 1800 g/m³, reflexibilidade (R_f) e emissividade (ϵ) de 0,23 e 0,98, respectivamente. A modelo de fachada verde proposto apresentava um IAF de 3,00, sua espessura (d) era de 0,10 cm, e apresentava uma distância (L) de 80 cm da superfície proposta que acompanha o modelo analisado.

Utilizar espécies trepadeiras fixadas nas superfícies de estruturas e edificações é uma estratégia bioclimática de grande popularidade, com destaque na atualidade, diante das vantagens de eficiência energética que essa metodologia apresenta. Entretanto, é de importância considerar o fato de que a cobertura vegetal é um ser vivo, assim, a fachada verde interage de forma complexa com o ambiente onde se encontra. Simular esse comportamento é uma consideração rara entre os estudiosos que pesquisam e trabalham com esse tema, tornando-se difícil a simulação com dados precisos e detalhados, diante da escassez de tal conteúdo, com limitados recursos para basear trabalhos e pesquisas (Larsen *et al*, 2015).

Foi proposto por Larsen *et al* (2015) um método simplificado de simulação de coberturas vegetais, como um elemento tradicional de parede, com propriedades definidas, com um modelo térmico incluído em análise por *software*, esse no caso, o *EnergyPlus*. Seu modelo não possuía uma espécie definida em específico, considerando uma fachada verde genérica, e estabeleceu para suas propriedades térmicas os valores de resistência térmica (R) 0,15 mK/W, condutividade térmica (λ) de 2,00 W/mK, transmitância térmica (U) de 0,20 W/m²K, calor específico (c) de 4,20 J/gK, densidade (ρ) de 1000 g/m³, reflexibilidade (R_f) e emissividade (ϵ) de 0,05 e 0,95, respectivamente. Suas dimensões de projeto foram estabelecidas com um IAF de 2,00, e uma espessura (d)

de 25 cm, e sua distância (L) não foi definida, entendendo-se que o estudo não considerou um elemento de ancoragem ou apoio para a cobertura vegetal.

Para solidificar as metodologias de aplicação de coberturas e revestimentos vegetais como, de fato, sistemas eficiência energética, é necessário o fomento dos estudos que quantificam e avaliam de forma cada vez mais real e precisa suas informações e características. De um ponto de vista com foco na funcionalidade, fachadas verdes possuem comportamento complexos, influenciados por suas dimensões, características e disposições, amplificando o número de variáveis que implicam e modificam seu comportamento e performance (Perini; Ottele, 2014).

Perini e Ottele (2014) desenvolveram um estudo de revisão que analisa as características e aspectos críticos dos sistemas mais comuns de jardins verticais, com foco no fomento ambiental. Seus estudos não definiram, unicamente, apenas uma espécie a ser analisada, pois abrangia um leque maior, devido a seu caráter de revisão, mas citaram, em seu texto, uma das espécies mais comumente utilizadas para a técnica de fachadas verdes, a *Hedera helix*, qual também já foi citada previamente na RSL da presente tese, no trabalho de outros autores.

O trabalho de revisão de Perini e Ottele (2014), levantou importantes características, a partir da literatura analisada em sua pesquisa, como o valor utilizado nos estudos de fachadas verdes para a espessura (d) da camada vegetal, em torno de 15 a 20 cm, aproximadamente. Assim como, da mesma forma, estabeleceu propriedades térmicas como a resistência térmica (R), de 0,09 mK/W, e a condutividade térmica (λ) e transmitância térmica (U), com os valores de 7,80 W/mK e 2,90 W/m²K, respectivamente.

Visto que existe uma lacuna na área da pesquisa e dados técnicos a respeito dos efeitos de performance térmica, conforto térmico e eficiência térmica para jardins verticais, Shuhaimi *et al* (2022) buscou investigar os efeitos de coberturas vegetais, com foco na transferência de calor desses sistemas, por meio de um método de previsão e análise de dados, conhecido como OTTV (*overall thermal transfer value*), a partir de uma série de estudos de casos hipotéticos.

Devido ao caráter hipotético, e de revisão de outros estudos, a pesquisa de Shuhaimi *et al* (2022), não estabeleceu uma espécie única para seu trabalho. Entretanto, suas considerações e equacionamentos baseados na literatura coletada em seu trabalho, estabeleceram propriedades importantes dos sistemas de jardins verticais, como a espessura (d) da cobertura vegetal proposta, de 5 cm, assim como uma distância (L) de 5 cm, e valores de resistência térmica (R) e transmitância térmica (U) de 0,60 mK/W e 1,66 W/m²K, respectivamente.

Ambientes e construções as quais abrigam um alto número de usuários, ou até mesmo comporta um alto fluxo diário deles, dependem muito do conforto do ambiente, para garantir aos indivíduos uma estadia e/ou passagem adequada. A implementação de jardins verticais nessas edificações e espaços impacta na qualidade do ar, performance térmica e melhora o consumo energético das estruturas (Abdeen; Rafaat, 2024).

O objetivo da pesquisa desenvolvida por Abdeen e Rafaat (2024) se baseia em estudar a influência dos jardins verticais em ambientes educacionais, analisando a instalação e o desempenho de uma cobertura vegetal instalada nas Universidades do

Canadá, com instalações situadas no Egito. O processo metodológico da pesquisa foi desenvolvido a partir da simulação de redução de ganhos térmicos e consumo de energia nos ambientes, assim como a redução da emissão de CO₂, utilizando o *DesignBuilder* para medir os efeitos da instalação de sistemas de jardins verticais nos corredores e no jardim interno da instalação.

Para caracterizar o modelo simulado Abdeen e Rafaat (2024), inseriram no *software* dados termofísicos do sistema de jardim vertical proposto, a partir da espécie *Hedera helix*, com valores de IAF de 5,00, espessura (d) e distância (L) entre a estrutura e a cobertura vegetal de 20 cm e 60 cm, respectivamente. E para as características térmicas, foi definido um valor de condutividade térmica (λ) de 0,36 W/mK, calor específico (c) de 2,80 J/gK, densidade (ρ) de 300 g/m³, porosidade (ϕ) e emissividade (ε) de 0,30 e 0,90, respectivamente.

Com o advento e o avanço consequente da tecnologia, as simulações de performance térmica e eficiência energética de cortinas verdes tornou-se uma ferramenta eficiente e precisa, porém o principal fator que dita como os resultados dessas simulações, são precisos e detalhados, é a alimentação das bases de dados internas dos *softwares* com as propriedades termofísicas das espécies utilizadas no jardim vertical. Dessa forma estimar, aferir e quantificar as propriedades das plantas utilizadas nas análises é extremamente importante e necessário para o ambiente científico que desenvolve pesquisas nesse tema (Zhou *et al.*, 2023).

Para solucionar o problema de informações desconhecidas sobre as propriedades termofísicas de cortinas verdes, Zhou *et al* (2023), utilizou o *software* algébrico Maple, em conjunto com o Algoritmo de Levenberg Marquardt (LM) como um método reverso de investigação das características necessárias. A aplicação do algoritmo LM, em uma cobertura vegetal de espessura (d) de 40 cm, e uma distância (L), proposta, de 10 cm e um IAF de 3,40, determinaram as propriedades termofísicas da cortina idealizada na pesquisa. Com valores de 4,40 W/mK para a condutividade térmica (λ), 7,17 J/gK para o calor específico (c) e densidade (ρ) de 6100 g/m³ e emissividade (ε) de 0,98.

Perera *et al* (2021) desenvolveu em sua pesquisa, a coleta de dados a respeito de nove espécies de plantas trepadeiras, comumente utilizadas em sistemas de jardins verticais, para aferir características as quais influenciam na performance térmica de um ambiente que ancora ou apoia uma cobertura vegetal. Para aprofundar os resultados e fomentar o caráter analítico e comparativo da pesquisa, os autores simularam a performance térmica da espécie *Anxonopus fissifolius*, conhecida popularmente como grama jesuíta ou grama missionária.

Diante da pesquisa desenvolvida, em conjunto com a simulação em *software*, para a espécie analisada, Perera *et al* (2022) determinou um valor de IAF de 3,20, com espessura (d) de 20 cm e distância (L) de 15 cm, além de suas propriedades de refletividade (R_f) e emissividade (ε) de 0,70 e 0,95, respectivamente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

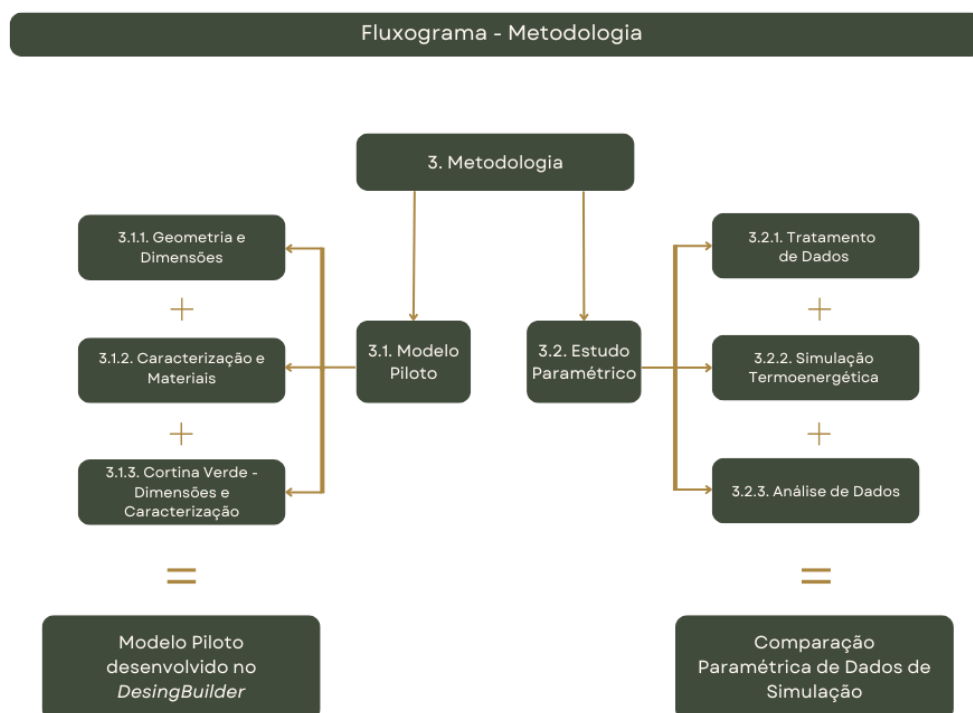
O presente capítulo registra os procedimentos e processos metodológicos adotados no desenvolvimento da pesquisa. Essa etapa da pesquisa consiste na organização e aplicação de sequências sistemáticas que estabelecem a rigorosidade científica e a fundamentação dos resultados a serem obtidos.

A partir dos objetivos definidos, a metodologia se consolida essencialmente em um processo descritivo da concepção e execução do modelo base a ser analisado, e o qual se torna a principal fonte de resultados a serem extraídos. A metodologia envolve a seleção das técnicas de coleta de dados e o procedimento de análise de informações e conteúdos referenciado.

O delineamento metodológico é fundamental para a literatura científica, uma vez que alinhado aos objetivos propostos pela pesquisa, permite sua replicação, fomenta o meio científico e acadêmico, além de solidificar a integridade e seriedade da pesquisa. A metodologia é o conjunto de procedimentos sistemáticos e racionais que estabelece segurança e pavimenta a estrutura do alcance dos objetivos da pesquisa (Marconi; Lakatos, 2021).

A seguir, são apresentados os subcapítulos 3.1 e 3.2, respectivamente, apresentados para abordar a concepção, caracterização e execução do modelo piloto e sobre o processo de parametrização e análise de dados do modelo quando aplicado sob a simulação termoenergética, essa sequência de procedimentos é ilustrada na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma do processo de metodologia.



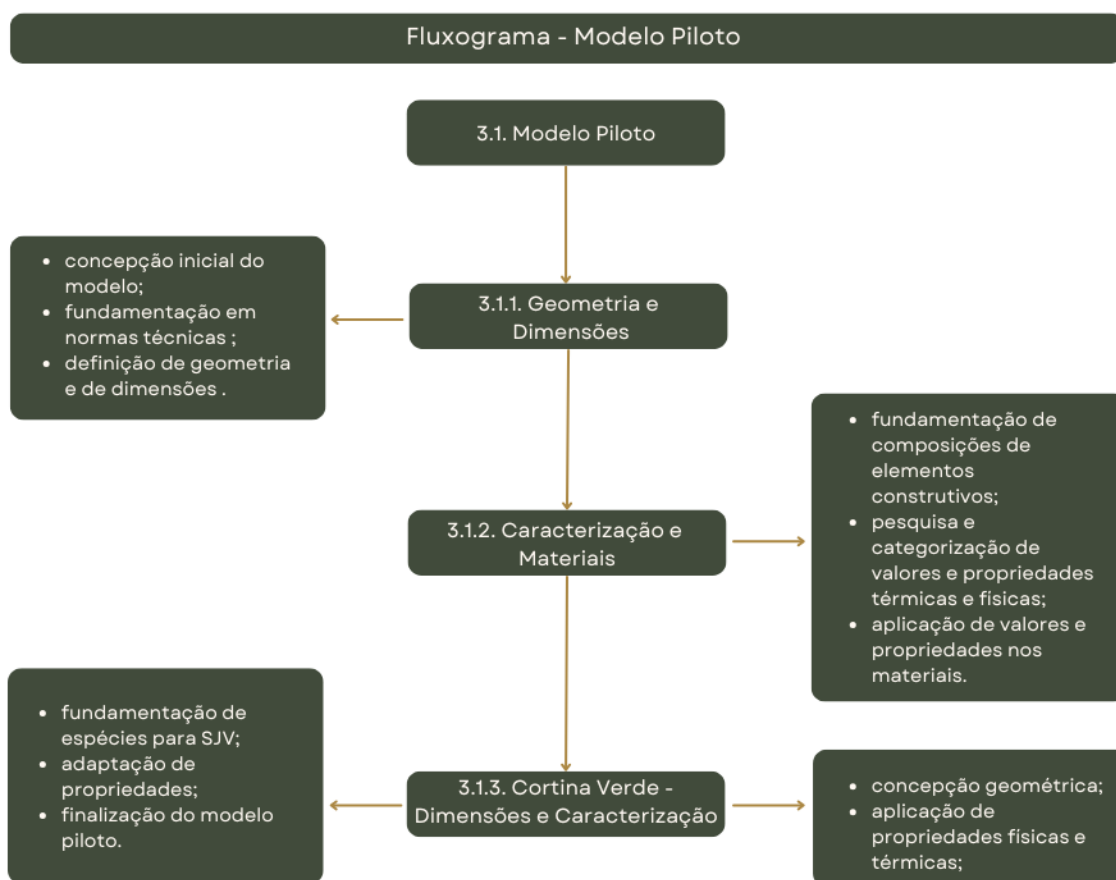
Fonte: Autor (2024).

3.1 Modelo Piloto

Esse item se inicia na concepção, de um modelo piloto, seguido de um processo de caracterização, inserindo as características e propriedades dos materiais que compõem as estruturas do modelo, e atingindo, finalmente, de fato a modelagem do objeto de estudo, o modelo piloto utilizado para a análise de performance termoenergética, conforme a abordagem proposta.

Dividido em três seções, como é apresentado na Figura 10, sendo a primeira definida pelo referenciamento e estabelecimento de dimensões e características geométricas, tanto do ambiente em si, quanto dos elementos construtivos que o compõe (esquadrias, alvenaria, cobertura etc.). A segunda seção é o processo de caracterização, onde acontece a alimentação de dados para o *software*, de forma a parametrizar corretamente as propriedades de cada elemento, a partir de um prévio referenciamento na normativa e em estudos científicos. Por fim, a última seção desse subcapítulo repete o processo das duas últimas, mas aplicando ao elemento de sistema de jardim vertical, definindo suas dimensões e propriedades, a fim de aplicar sua modelagem dentro do *software* e o combinando com o modelo piloto.

Figura 10 - Fluxograma do processo de metodologia.



Fonte: Autor (2024).

3.1.1 Geometria e Dimensões

Foi modelado um ambiente, com geometria semelhante à de um dormitório ou quarto residencial. Segundo a NBR 15575 (2021), que define os parâmetros de Edificações Habitacionais e seu desempenho, um ambiente de dormitório deve possuir uma área mínima de 6 m² e um pé direito mínimo de 250 cm de altura. Dessa forma, o modelo piloto teve suas dimensões estabelecidas em 400 x 300 cm, culminando em uma área de 12 m² e um pé direito (*h*) de 300 cm.

Para as condições de ventilação e iluminação a NBR 15575 (2021) e a NBR 15215 – Iluminação Natural (2024) definem que as esquadrias apresentem dimensões mínimas equivalentes a 10% da área total de piso para iluminação e 5% da área total de piso para ventilação. Levando em consideração a área de 12 m² do ambiente, as dimensões mínimas para iluminação e ventilação devem ser de 1,20 m² e 0,60 m², respectivamente ($0,10 \times 12,00 = 1,20$ e $0,05 \times 12,00 = 0,60$). Assim, foi escolhida uma janela com dimensões de 1,50 x 1,00 m, e um peitoril de 1,10 m, atendendo todos os requisitos prescritos na NBR. Ainda tratando a respeito das esquadrias do modelo, segundo NBR 9050 – Acessibilidade (2020), as portas de acesso a dormitórios devem ter um vão de 80 cm. A porta escolhida para o modelo tem dimensões de 80 x 210 cm.

Levando em consideração que o modelo apenas simula a proposta de um dormitório, as paredes de alvenaria do entorno do ambiente seguiram os parâmetros estabelecidos pela NBR 15270 – 1: Componentes cerâmicos (2017), define que paredes de alvenaria de tijolos cerâmicos, as quais não possuem função estrutural, devem possuir uma largura mínima de 9 cm. Considerando os substratos de revestimento e acabamento para paredes em alvenaria, as camadas de chapisco, emboço e reboco devem possuir 0,30 cm, 1,50 cm e 0,50 cm, respectivamente, como rege a NBR 13529 – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas (2013).

As definições realizadas foram essenciais para determinar a espessura da parede de alvenaria adotada no modelo, seguindo as normas citadas nos parágrafos anteriores. O núcleo principal da parede, constituído por tijolos cerâmicos, foi estabelecido com uma espessura de 9 cm, valor mínimo prescrito pelas normas técnicas vigentes. Sobre este núcleo, foi aplicado o chapisco, com espessura de 0,50 cm, configurando a camada inicial destinada a promover a aderência das demais camadas. Em seguida, o emboço, responsável pela regularização da superfície, foi dimensionado com 1,50 cm de espessura. Finalmente, o reboco, correspondente à camada de acabamento, recebeu uma espessura de 1 cm. Assim, a parede de alvenaria apresentou uma largura total de 15 cm, resultante da soma do núcleo principal de 9 cm e das camadas de revestimento, que totalizaram 6 cm (considerando a aplicação de 0,50 cm de chapisco, 1,50 cm de emboço e 1 cm de reboco em cada face da parede).

Os elementos estruturais que definiram as extremidades, inferior e superior, do ambiente, foram o contrapiso e a laje, respectivamente. Contrapisos de edificações que possuem um caráter mais simples, sem altas cargas mecânicas ou tráfego intenso, podem se limitar a apenas 2,5 cm de espessura, feito de concreto com superfície nivelada e polida, como rege a NBR 14931 – Execução de estruturas de concreto (2023). Já os elementos estruturais como as lajes, segundo a NBR 6118- Projeto de estrutura de concreto (2023), considerando que o elemento seja de concreto armado e um composto

maciço, deve compreender 10 cm de espessura, lajes nervuradas devem atender a mesma dimensão mínima, garantindo que sua parte sólida seja de ao menos 4 cm.

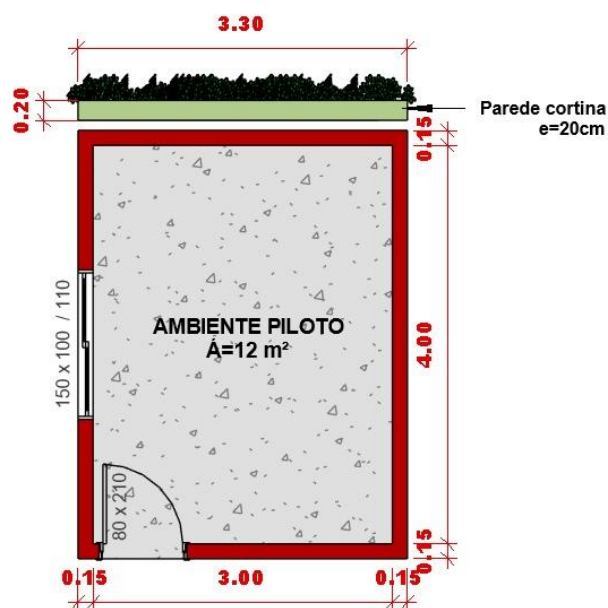
Diante do levantamento de geometria e dimensões a respeito das estruturas de contrapiso e laje, e considerando que o modelo compreende uma composição simples de materiais para a simulação, foi considerado um contrapiso de 5 cm e uma laje de 10 cm, atendendo aos valores mínimos de norma e simplificando o modelo, de modo a facilitar os processos de análise e simulação.

O item final do processo de concepção de dimensões para o modelo piloto foi a cobertura, com um beiral de 50 cm, uma extensão adequada e, telhas do tipo sanduíche, precisam ter uma inclinação de 15%, de acordo com a disposição apresentada, segundo a NBR 15575 – Edificações Habitacionais – Desempenho (2021).

Essa etapa de levantamento é importante para a iniciar o processo metodológico da pesquisa. A fundamentação analisada e coletada nas normas técnicas da ABNT permitiu categorizar as informações a respeito de dimensões mínimas, máximas e indicadas para os elementos construtivos que compõem uma edificação, do caráter onde se baseia o modelo piloto abordado. Assim, com a finalização da concepção do modelo, tratando das características dimensionais do modelo, foi possível de fato aplicar todas as propriedades definidas, realizando a modelagem de um projeto no *software DesignBuilder*.

É indicado na Figura 11 a escolha das dimensões do *layout* do modelo, de forma a produzir, um ambiente que segue as dimensões previamente descritas, a respeito do comprimento e largura do cômodo, e conseqüentemente sua área. Além disso, é possível perceber a presença das esquadrias escolhidas, tanto a porta quanto a janela, também respeitando as dimensões definidas. Nessa disposição, uma vista em planta, ademais é visível, e medida, a espessura total da parede. As Figuras 11, 12, 13 e 14, foram geradas a partir do *software Revit*, da *Autodesk*, com o objetivo de garantir uma melhor disposição visual do modelo piloto e de suas dimensões e elementos. A Figura 19 da esquadria, e a Figura 21, do modelo finalizado, também foram geradas a partir do *Revit*.

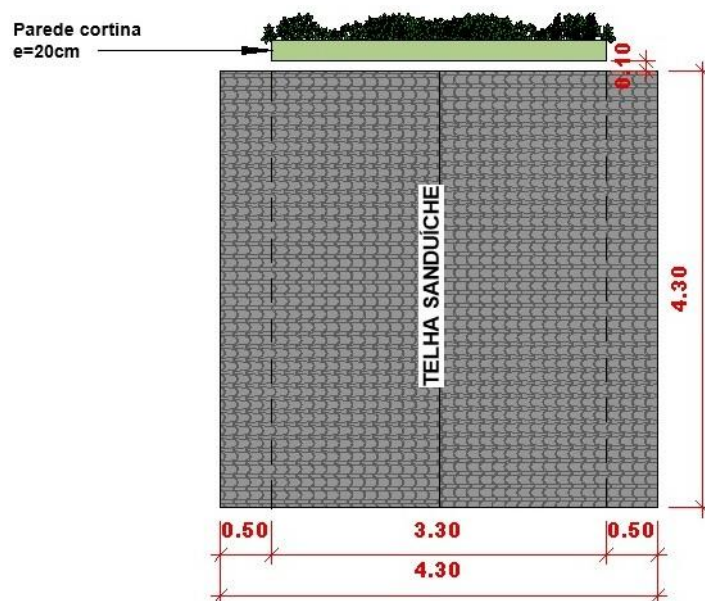
Figura 11 - Vista em planta do modelo piloto.



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 12, que segue a orientação da vista abordada na imagem anterior, é apresentado o conjunto da cobertura, previamente referenciado e definido, com os elementos de platibanda, qual acompanha a espessura das paredes de alvenarias do ambiente térreo, e o núcleo central da cobertura em duas águas, as telhas metálicas, do tipo sanduíche para fechar o telhado.

Figura 12 - Vista em planta de cobertura do modelo piloto.



Fonte: Autor (2024).

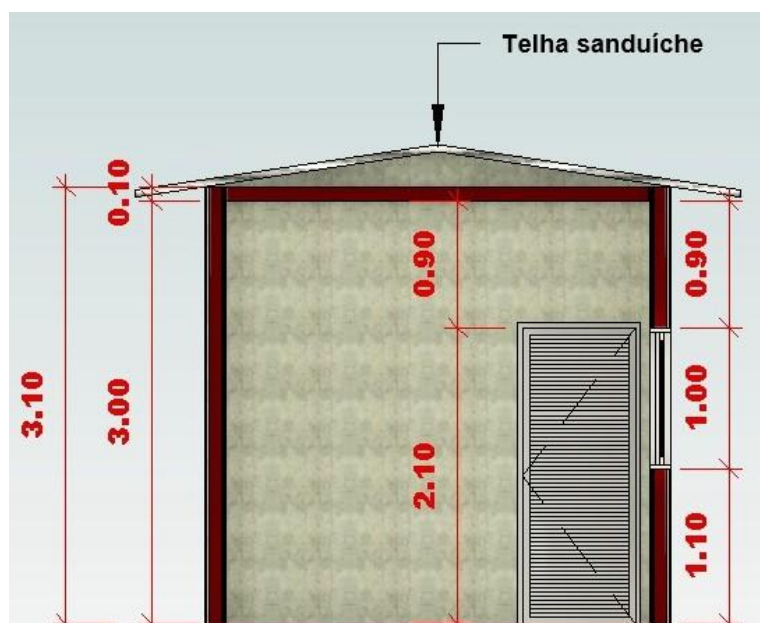
Para complementar a visualização do modelo, a partir das Figuras 13 e 14 é possível visualizar os cortes, em dois sentidos perpendiculares, para trazer as dimensões e disposições que são visíveis nessa visualização. É possível ver a espessura das paredes, como nas imagens anteriores, as esquadrias, suas alturas (tanto suas medidas totais quanto o peitoril no caso da janela), a altura do ambiente do modelo, as espessuras do contrapiso e da laje e por fim as alturas da platibanda e da configuração do telhado metálico.

Figura 13 - Corte A, com vista frontal para a janela.



Fonte: Autor (2024).

Figura 14 - Corte B, com vista frontal para a porta.



Fonte: Autor (2024).

3.1.2 Caracterização e Materiais

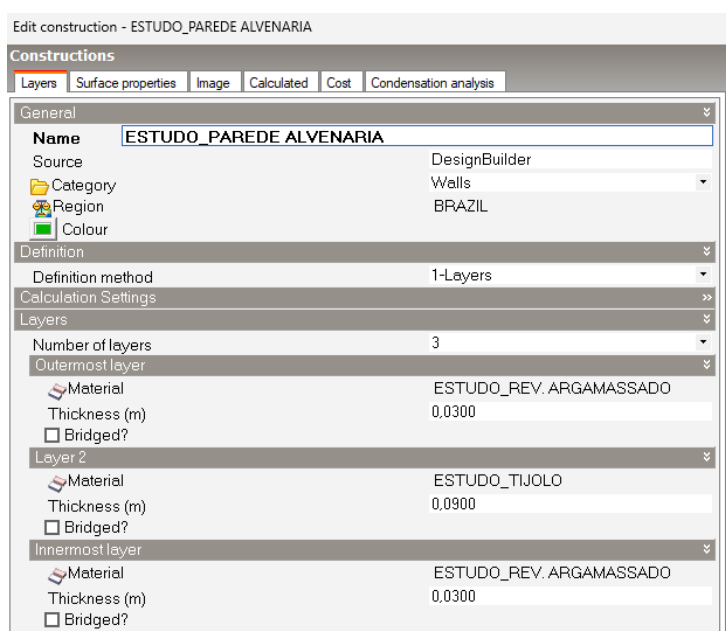
Essencialmente, após a finalização da etapa de elaborar a concepção de *layout* e estrutura do modelo, foi feita sua modelagem dentro do *DesignBuilder*. Em seguida, desenvolvida sua caracterização de cada bloco de construção que compõe o conjunto modelado. No *DesignBuilder*, os blocos de são elementos fundamentais para modelagem de informações de construção, representando objetos paramétricos que podem ser usados no projeto, como a estrutura e sua disposição geométrica, além de conceber o *template* de construção. Cada *template* contém parâmetros específicos que permitem a personalização e automação de informações e dimensões, facilitando a criação de modelos detalhados e consistentes (*DesignBuilder*, 2023).

Para tal, os componentes construtivos, presentes nos *templates*, foram caracterizados, para aumentar a consistência do modelo e como as interações de análise puderam atingir maiores níveis de solidez foram: paredes, contrapiso, laje, telhado e esquadrias.

As paredes do modelo, criadas seguindo o ideal de paredes simples quem cercam foram definidas em 3 camadas. Para simplificar o desenvolvimento do modelo, as camadas de chapisco, emboço e reboco foram reunidas em uma camada única, definida como revestimento argamassado, essa decisão foi tomada em vista de apresentarem propriedades térmicas e físicas extremamente próximas. Mas sua dimensão foi somada, resultando em 3 cm de revestimento, de cada lado da alvenaria, como segue a Figura 15.

Cada camada que compõe o conjunto foi caracterizada com as propriedades físicas e térmicas segundo as normas técnicas e referenciais consistentes que fornecem informações definidas e revisadas, como é indicado na Tabela 6.

Figura 15 – Componente construtivo de parede de alvenaria.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 6 - Propriedades físicas e térmicas de uma parede de alvenaria com tijolos cerâmicos.

Parede em alvenaria com tijolos cerâmicos	
Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	2000
Condutividade térmica (W/ mK)	1,20
Calor específico (J/g °C)	1,00
Resistência térmica (mK/W)	0,13

Fonte: Autor (2024).

Segundo a NBR 15270 – 1: Componentes cerâmicos – Requisitos para blocos e tijolos de alvenaria estrutural e de vedação (2005) e ressaltado por Souza e Paliari (2019), a densidade média de uma parede de alvenaria com tijolos cerâmicos gira em torno de 1600 kg/m³ a 2000 kg/m³, de acordo com os materiais utilizados. A NBR 15220 – 2: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo de transmitância térmica, capacidade térmica, fator solar e atraso térmico (2005) estabelece os valores médios para as outras propriedades registradas na Tabela 6. A camada inicial de substrato, o chapisco, foi definido, seguindo a mesma categorização e classificação, como é indicado na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades físicas e térmicas do chapisco.

Chapisco	
Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	2200
Condutividade térmica (W/ mK)	1,50
Calor específico (J/g °C)	0,84
Resistência térmica (mK/W)	0,0025

Fonte: Autor (2024).

A faixa de valor de densidade de 1800 kg/m³ a 2200 kg/m³ atrelado ao chapisco é definida pela NBR 13281 – Argamassa para assentamento e revestimento de tetos e paredes – Requisitos (2022), e os valores das outras propriedades é estabelecido pela NBR 15220 – 2: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo de transmitância térmica, capacidade térmica, fator solar e atraso térmico (2005).

Prescrito sob a camada de chapisco, em sequência, é aplicada a camada de emboço, e tem sua caracterização conforme os valores da Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades físicas e térmicas do emboço de argamassa.

Emboço de argamassa	
Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	2200
Condutividade térmica (W/ mK)	1,50
Calor específico (J/g °C)	0,84
Resistência térmica (mK/W)	0,0125

Fonte: Autor (2024).

Os valores de densidade para o emboço seguem as definições da NBR 13281 (2022), e as propriedades térmicas são referenciadas a partir da NBR 15220 – 2 (2005), com valores semelhantes aos do chapisco. Por fim, concluindo o conjunto da família de paredes inserido no modelo, foi realizada a caracterização da camada final, o reboco, registrada a seguir na Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades físicas e térmicas do reboco para regularização.

Reboco para regularização	
Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	2200
Condutividade térmica (W/ mK)	1,50
Calor específico (J/g °C)	0,84
Resistência térmica (mK/W)	0,042

Fonte: Autor (2024).

Assim como as duas últimas camadas de substrato, os valores foram retirados das NBRs 15220 – (2005) e NBR 13281 (2022), para propriedades térmicas e densidade, respectivamente.

É possível perceber, de acordos com as Tabelas 6, 7 e 8, que os valores são iguais, para as propriedades de densidade, condutividade térmica e calor específico, a resistência térmica apresenta valores diferentes ao longo das três tabelas pois varia diretamente de acordo com a espessura das camadas, as quais essas são divergentes. Esse fato está fortemente ligado ao fato que todas essas camadas de substrato são compostas pelos mesmos materiais, primordialmente, água, cimento e areia (o chapisco essencialmente leva brita em sua composição), fator esse que é reforçado pela cultura nacional de trazer o emboço e o reboco como uma camada única. Este revestimento consiste na aplicação de uma única camada de argamassa diretamente sobre a alvenaria, a fim de regularizar e proteger a superfície da parede contra como umidade, temperatura e sujeiras, além de proporcionar uma base para acabamentos subsequentes, como pintura ou outros tipos de revestimento. A argamassa utilizada pode várias as proporções de acordo com a necessidade e o tipo de construção (NBR 13281, 2022 e NBR 15220 – 2, 2005).

A caracterização dos elementos construtivos do modelo teve sua segunda etapa no contrapiso. Esse item constitui a base, e principal hospedeiro para o restante dos elementos do modelo. O contrapiso modelado no *DesignBuilder* foi projetado a partir do *template* do tipo *ground floor* (piso térreo), que forma uma geometria de uma área, e assim, torna-se tridimensional a partir de sua caracterização dimensional, como sua espessura, definida anteriormente neste capítulo, como 5 cm.

Como é apresentado na Figura 16, o contrapiso é constituído de uma camada única, apenas seu núcleo principal feito de concreto maciço. A caracterização desse elemento é ilustrada de acordo com a Tabela 10.

Figura 16 – Componente construtivo de contrapiso.

The image shows a software window titled "Edit construction - ESTUDO_CONTRAPISO". It has several tabs: "Constructions", "Layers", "Surface properties", "Image", "Calculated", "Cost", and "Condensation analysis". The "Constructions" tab is selected. Under "General", the "Name" field contains "ESTUDO_CONTRAPISO". The "Source" field is empty. The "Category" is set to "Floors (ground)" and the "Region" is set to "BRAZIL". The "Definition" section shows "Definition method" as "1-Layers". The "Layers" section shows "Number of layers" as "1". The "Single layer" section shows "Material" as "ESTUDO_CONC. CONTRAPISO" and "Thickness (m)" as "0,0500". The "Bridged?" checkbox is unchecked.

Fonte: Autor (2024).

Tabela 10 - Propriedades físicas e térmicas do contrapiso.

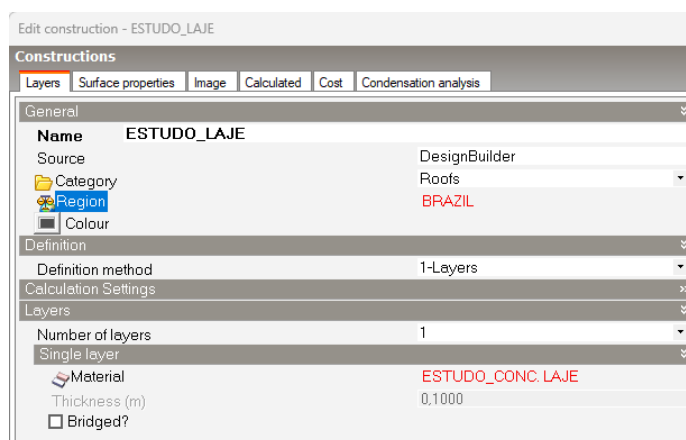
Contrapiso maciço de concreto	
Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	2500
Condutividade térmica (W/ mK)	1,60
Calor específico (J/g °C)	0,84
Resistência térmica (mK/W)	0,031

Fonte: Autor (2024).

Por conta do modelo ser constituído de uma representação simples, visto que a principal abordagem da pesquisa é voltada para a análise termoeenergética, o contrapiso foi projeto como uma camada única de concreto maciço. Para uma composição mais generalizada, e um traço convencional, a densidade do contrapiso varia entre os valores de 2200 kg/m³ e 2500 kg/m³, de acordo com a NBR 6118 (2023) e Mehta e Monteiro (2014). As propriedades térmicas do contrapiso são definidas pela NBR 15220 – 2 (2005) e reforçadas pelos autores Bazzano e Neto (2016) para a condutividade térmica e Mehta e Monteiro (2014) referente ao calor específico desse elemento construtivo.

O elemento de laje estrutural foi feito a partir do componente de construção *roof* (telhado), uma vez que o programa entende esse fechamento da edificação como um telhado. De acordo com a Figura 17, a laje, definida com a espessura de 10 cm é constituída por um elemento único, seu núcleo principal feito de concreto maciço, caracterizado com propriedades físicas e térmicas, indicado na Tabela 11.

Figura 17 – Componente construtivo de laje.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 11 - Propriedades físicas e térmicas da laje maciça.

Laje maciça de concreto	
Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	2500
Condutividade térmica (W/ mK)	1,60
Calor específico (J/g °C)	0,84
Resistência térmica (mK/W)	0,062

Fonte: Autor (2024).

As propriedades físicas e térmicas da laje e do contrapiso apresentam os mesmos valores, fator esse atrelado a condição que de ambos serem compostos pelo mesmo material principal (concreto) e serem constituídos de uma camada única, apenas divergindo no valor de resistência térmica, uma vez que essa propriedade varia seu valor de acordo com a espessura do elemento.

A estrutura de telhado do modelo piloto foi executada em telhas termoacústicas ou telhas termoisolantes, comumente conhecidas como “telhas sanduiche”, utilizando a ferramenta de projeto de componente *block* (blocos de componente), normalmente utilizados para adicionar elementos construtivos adjacentes e complementares na edificação. O termo “telha sanduiche” deriva da estrutura composta por duas camadas externas e um núcleo interna. Essa estrutura tripla é composta por duas chapas metálicas externas (aço galvanizado, alumínio ou outra liga metálica) que funcionam como revestimento, e um núcleo intermediário de material isolante (poliestireno expandido, poliuretano ou poli isocianurato). O núcleo isolante tem a função de reduzir a transferência térmica e reduzir ruídos, enquanto as chapas externas garantem resistência estrutural, durabilidade e proteção contra ações externas como chuva e insolação. Essa configuração garante desempenho térmico e acústico, além de ser uma solução de cargas mecânicas reduzidas (Silva; Nascimento; Almeida, 2019; Santos; Carvalho, 2020; NBR 14513, 2022).

Para atender a proposta de caracterização do componente *block* do *DesignBuilder*, foi reunir as características das chapas de aço galvanizado (Tabela 12) e do núcleo de EPS, poliestireno expandido (Tabela 13), em um só elemento, gerando o item único de “telha termoacústica”, com sua resultante de características e de dimensões conforme a Figura 18.

Figura 18 – Bloco de componente de telha termoacústica.

Fonte: Autor (2024).

Dessa forma, foram feitas duas tabelas de caracterização, registrando, de forma separada, as propriedades térmicas e físicas dos materiais que compõem o elemento de telha, de acordo com as Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Propriedades físicas e térmicas da chapa de aço da telha sanduíche.

Chapa de aço galvanizado	
Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	7850
Condutividade térmica (W/ mK)	60
Calor específico (J/g °C)	0,46
Resistência térmica (mK/W)	0,000006

Fonte: Autor (2024).

As propriedades registradas na Tabela 11 para as extremidades metálicas da telha sanduíche são referentes a chapas de aço galvanizado de aproximadamente 3 mm, que cobrem a extensão de cada peça unitária de telha que compõem a cobertura, conforme a NBR 14513 (2022) e NBR 14514 (2022). O mesmo regimento normativo é atribuído as condições registradas para o enchimento de EPS que preenche o espaço entre as chapas de aço galvanizado, de aproximadamente 3 cm, resultando nas propriedades físicas e térmicas apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Propriedades físicas e térmicas do EPS da telha sanduíche.

EPS (poliestireno expandido)	
Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	20
Condutividade térmica (W/ mK)	0,040
Calor específico (J/g °C)	1,25
Resistência térmica (mK/W)	0,038

Fonte: Autor (2024).

Diante da definição de uma telha com aproximadamente 4 cm de espessura (visto que as chapas metálicas, somadas, resultam em uma espessura de 6 mm) as Tabelas 12 e 13 registram as características físicas e térmicas desse elemento composto, de acordo com as a NBR 14513 (2022) e NBR 14514 (2022) para as chapas metálicas e a NBR 11752 (2021) para os elementos de EPS, e com o fomento das informações pelos estudos de Silva; Nascimento; Almeida (2019) e Santos e Carvalho (2020).

Assim como as paredes e o telhado, os elementos de esquadrias também são itens compostos, pois possuem dois materiais em sua composição, sendo o alumínio e o vidro. Esquadrias mistas de alumínio e vidro são amplamente utilizadas em construções residenciais devido à combinação de resistência mecânica, leveza e estética, assim como custo-benefício. O alumínio apresenta resistência contra corrosão e extensa vida útil. O vidro garante iluminação natural, integração visual com o ambiente externo e conforto térmico e acústico. Dessa forma, essa categoria de esquadrias é aplicada em modelos residenciais. Estudos apontam que o uso de vidros duplos ou laminados em conjunto com perfis de alumínio com barreiras térmicas melhora significativamente o isolamento térmico e acústico (Souza e Carvalho, 2021; Santos e Lima, 2020).

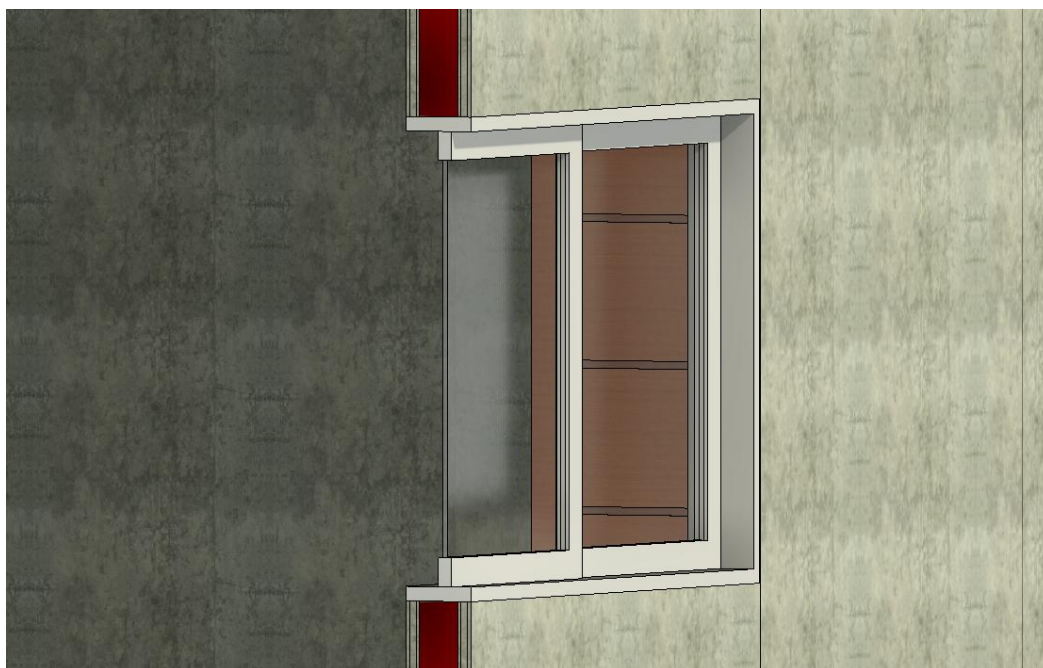
A plataforma de modelagem e caracterização do *DesignBuilder* permitiu caracterizar o elemento de vidro das janelas com os valores de espessura da lâmina de vidro e sua condutividade térmica, dentro do *template* de aberturas, conforme a Figura 19, e a Figura 20 apresenta a visualização do modelo da esquadria.

Figura 19. Componente de abertura, janela.



Fonte: Autor (2024).

Figura 20 - Camadas da família das esquadrias - janela.



Fonte: Autor (2024).

Na Tabela 14 estão registrados os valores das propriedades físicas e térmicas dos vidros que compõem esquadrias mistas da construção civil, com uma espessura de 3 mm (NBR 15575, 2021; Oliveira; Pereira, 2021).

Tabela 14 - Propriedades físicas e térmicas dos elementos de vidro.

Vidro para esquadrias	
Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	2500
Condutividade térmica (W/ mK)	1,00
Calor específico (J/g °C)	0,80
Resistência térmica (mK/W)	0,004

Fonte: Autor (2024).

Em suma, o processo metodológico do modelo piloto teve seu início no levantamento de dados, em referências normativas, para formar a concepção do modelo, definindo a geometria, dimensões e composição do modelo. Seguido da etapa de caracterização, uma vez que a forma do modelo jazia pré-estabelecida a partir da etapa anterior, que também foi orientada a partir de dados presentes em normas e fomentado pela pesquisa em artigos científicos e acadêmicos para preencher lacunas de informações específicas ou que se apresentam em estudos e análises experimentais e empíricas.

Esse processo permitiu, a partir das ferramentas de modelagem do *DesignBuilder*, mais precisamente, os componentes de construção, desenvolver o modelo piloto proposto pelo referente capítulo, respeitando as dimensões, posições e geometrias definidas anteriormente, referenciadas por normas, assim como caracterizar os materiais que compõem as estruturas, também com o devido referenciamento em normas e artigos.

3.1.3 Cortina Verde – Dimensões e Caracterização

Diante da complexidade de representação digital, caracterização e análise de elementos vegetais em *software* de modelagem e parametrização, foi realizado um subcapítulo específico para descrever o processo de inserção da cortina verde dentro do modelo piloto. O principal fator em volta da dificuldade de trazer coberturas vegetais para análises parametrizadas se dá pela condição das fachadas verdes serem, essencialmente, um ser vivo, que possui ciclos bióticos e interações químicas e biológicas internas e externas, além de ser abstruso prever e controlar com alto nível de precisão a dinâmica de crescimento, expansão e comportamento de coberturas vegetais (Pacheco *et al.*, 2020; Lopes; Silva, 2019).

A partir da revisão sistemática de literatura previamente realizada nessa pesquisa, foram coletados e registrados dados físicos e térmicos de diversas espécies de fachadas verticais ao longo de uma gama de estudos, experimentais e de simulação, de autores que pesquisaram a respeito de sistemas de jardins verticais e análises termoenergéticas.

Para critério de modelagem e inserção de uma fachada verde piloto ancorada a estrutura projetada, foram aplicados dados da pesquisa que mais apresentava solidez, e menos lacunas informativas, na cobertura vegetal que segue no modelo.

A concepção geométrica e dimensional do sistema de jardim vertical se baseou no estudo de Sulkje *et al.* (2019), que utilizou a espécie *Phaesolus vulgaris*, conhecida como vagem ou o feijão-vagem, para a atribuição de valores de propriedades térmicas e físicas. Entretanto, devido a lacuna na pesquisa do autor para a propriedade de resistência térmica da espécie, esse valor foi preenchido pelas informações encontradas no estudo de Vo, Nichersu e Wendel (2019), que pesquisou a respeito da *Parthenocissus tricuspidata*, a falsa-vinha ou hera japonesa. A partir dessa convergência de dados foi feita a Tabela 15.

Tabela 15 - Propriedades físicas e térmicas do sistema de jardim vertical.

Jardim vertical	
Propriedade	Valor
Espessura (m)	0,20
Vão (m)	0,10
Resistência térmica (mK/W)	0,25
Condutividade térmica (W/mK)	1,10
Transmitância térmica (W/m ² K)	0,20
Calor específico (J/g °C)	0,88
Densidade (kg/m ³)	1,80
Reflexividade	0,23
Emissividade	0,98

Fonte: Autor (2024).

Os dois primeiros valores indicados na Tabela 16, a espessura da cobertura vegetal e seu vão (distância entre a fachada verde e a estrutura da edificação) são valores de projeto, ou seja, não dependem intrinsecamente das espécies, de sua biologia e fisiologia, mas sim da decisão do projetista ou autor que está a implementar um sistema de jardim vertical. Assim, esses valores foram retirados dos estudos de Capener e Sikander (2015) e Abdeen e Rafaat (2024), o primeiro sendo datado de dez anos e o segundo de um ano, e ambos apresentam valores de projeto a respeito da espessura e da distância de vão semelhantes, e estudam a mesma espécie, a *Hedera helix*.

As espécies *Phaesolus vulgaris*, *Parthenocissus tricuspidata* e *Hedera helix*, presentes nos estudos dos autores anteriormente citados, são três espécies de plantas trepadeiras comumente utilizadas em sistemas de jardins verticais, e possuem características de crescimento e plantio em comum, assim apresentando condições

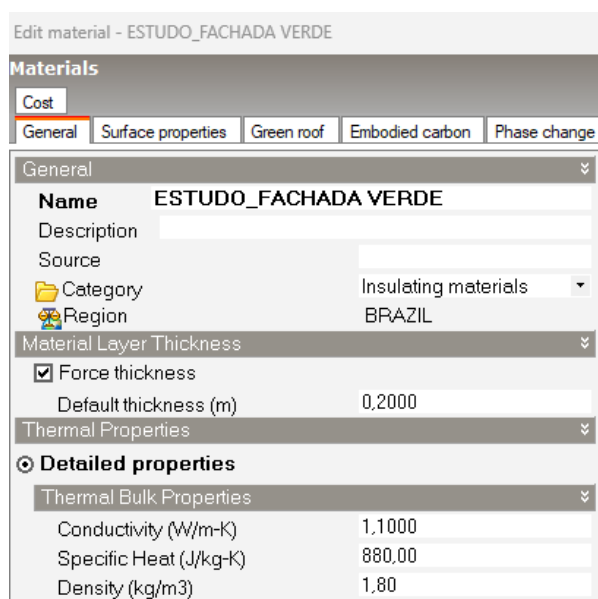
biológicas, químicas e fisiológicas semelhantes. Apesar de serem originárias da Ásia oriental, Américas e Europa e Ásia ocidental, respectivamente, todas permitem plantio em condições de climas temperados, tropicais e subtropicais, com altos níveis de adaptação para as regiões do território do Brasil, por exemplo (Costa; Amaral, 2019; Fernandes; Oliveira, 2018; Oliveira; Freitas; Silva, 2020; Silva; Oliveira; Freitas, 2021).

A semelhança entre as espécies que forneceram informações, a partir dos estudos dos autores citados, permitiu a adaptação da tabela, coletando dados majoritários de uma espécie e preenchendo as lacunas encontradas com os dados de outras duas espécies com alto grau de identificação e semelhança.

Dessa forma, a partir da adaptação de dados efetuada, foi executada a modelagem da cobertura vegetal com uma dimensão de 300 x 300 cm (primeira dimensão referente a largura do ambiente, e a segunda referente ao pé-direito) fixada na fachada norte. No hemisfério sul, a fachada que enfrente maior insolação ao longo do dia é a fachada norte, devido à inclinação do eixo terrestre, o sol incide predominantemente nessa direção. Essa característica faz com que a fachada norte esteja suscetível a uma maior radiação solar direta durante todo o ano, especialmente nos períodos de verão (Monteiro; Mendonça, 2003). Essa decisão de projeto é atribuída a proposta de estabelecer condições extremas, ou “pior situação” para o modelo, e assim obter valores maiores e mais visíveis.

Na Figura 21 e 22 está presente a disposição visual da aba de caracterização do DesignBuilder que se refere diretamente a manipulação das propriedades físicas e térmicas da fachada verde. No *software* foram aplicadas as propriedades que estão registradas na Tabela 15, de modo a estabelecer um modelo piloto funcional dentro do programa, com seus devidos componentes construtivos já definidos e configurados.

Figura 21. Configuração geral do material da fachada verde.



Fonte: Autor (2025).

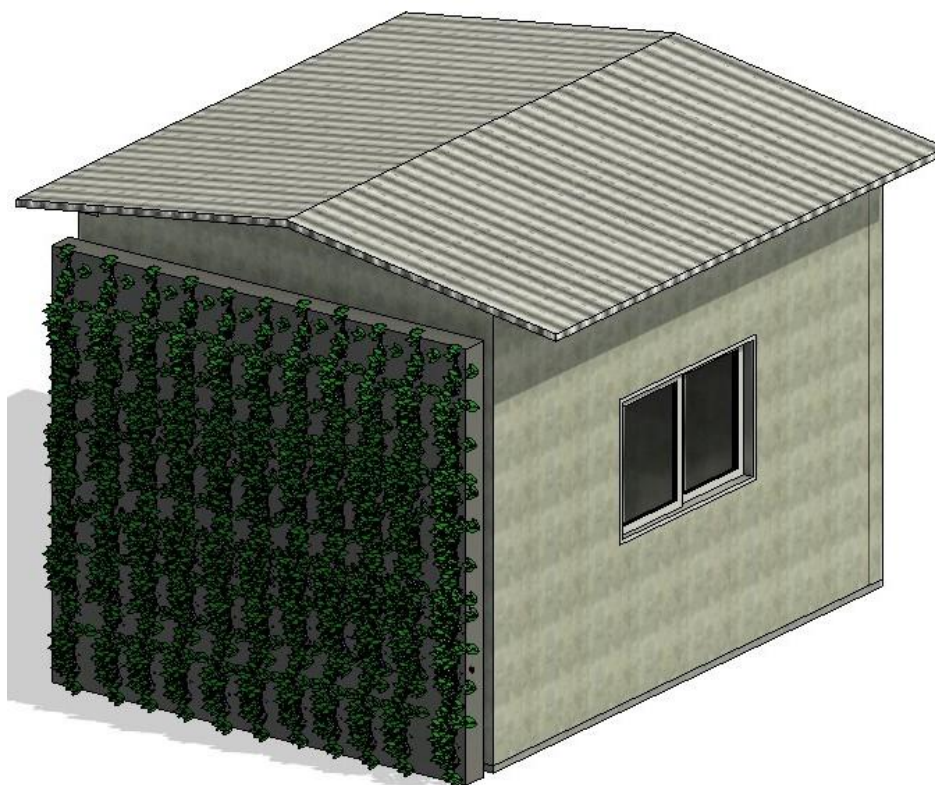
Figura 22. Configuração de superfície do material de fachada verde.



Fonte: Autor (2025).

Com a concepção formada baseada nos estudos referenciados, e adaptação de dados para complemento de informações, foi desenvolvido um sistema de jardim vertical piloto com o intuito de aperfeiçoar a identificação visual e permitir o discernimento da fachada verde do resto da estrutura como segue a Figura 23.

Figura 23 - Vista 3D do modelo piloto com a aplicação da cortina verde.



Fonte: Autor (2025).

3.2 Estudo Paramétrico

O segundo subcapítulo da metodologia consiste no estudo paramétrico, onde será feito o tratamento de dados das simulações termoeenergéticas. O termo estudo paramétrico se refere a uma análise para aperfeiçoar a compreensão de como as variáveis de entrada, ou seja, os parâmetros influenciam os resultados do sistema proposto. Essa etapa da pesquisa tem o objetivo de determinar a sensibilidade do sistema e o grau de impacto das características a serem variadas dentro do estudo (Montgomery, 2013).

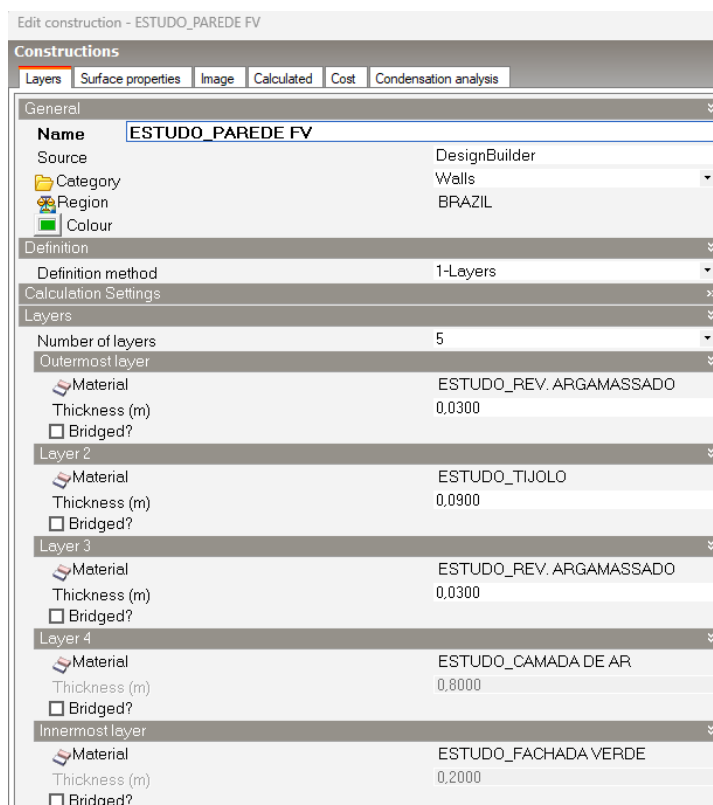
O estudo paramétrico varia sistematicamente uma, duas ou mais variáveis dentro de um intervalo definido, avaliando o comportamento do sistema, e como responde de acordo com as variações. A parametrização dos dados e, conseqüentemente, dos resultados permite identificar padrões, pontos de impacto e condições e fatores ideais para um sistema. Desenvolver a parametrização analítica de uma pesquisa é fundamental para modelos que propõem representar comportamentos de sistemas complexos (Box; Draper, 1987).

Fundamentalmente, a proposta do estudo paramétrico para a pesquisa se define na variação das propriedades, as quais são baseadas nas tabelas de características físicas e térmicas desenvolvidas na RSL, da cortina verde aplicada no modelo piloto, e efetuar simulações termoeenergéticas, permitindo analisar o teor de influência de cada propriedade. Existe o entendimento que os valores atribuídos a d e L , que representam, respectivamente, a espessura e a distância do vão, em metros, da cobertura vegetal são condições de projeto, ou seja, são definidas a partir da decisão dos projetistas ou pesquisadores que interagem com os sistemas de jardins verticais. A partir dessa definição, foi decidido estabelecer um valor fixo para d , de 20 cm, visto que a média dos valores da tabela de RSL é de 18 cm, então a partir de uma simplificação dos valores para o *software* analisar, foi decidido trabalhar com o valor de 20 cm.

Outra propriedade que também é considerada uma condição de projeto, à mercê das decisões dos autores, é o vão (L) entre a cobertura vegetal e a estrutura construtiva do modelo piloto. Entretanto, para ampliar o leque de resultados, foi decidido variar esse valor entre o menor (0 cm, SJV em contato direto com a alvenaria) e o maior (80 cm) vão encontrado no levantamento realizado na RSL.

Para inserir, da forma mais prática e precisa, um sistema de jardim vertical na modelagem do *DesignBuilder* foi decidido aplicar esse elemento como um *layer* (camada) extra no componente construtivo da parede da face norte do projeto. Dessa forma a fachada verde foi inserida no conjunto de elementos que compõem o componente de parede, junto das outras camadas, como o núcleo principal de tijolos, o revestimento argamassado, e a camada de ar (distância entre a fachada verde e a parede da edificação), como pode ser visto na Figura 24.

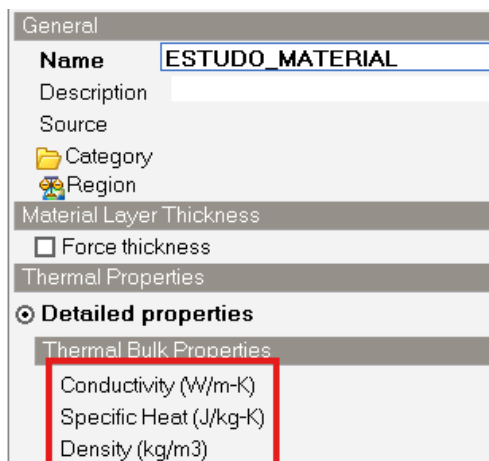
Figura 24. Conjunto de camadas dos componentes estruturais.



Fonte: Autor (2025).

Com essas condições definidas, a etapa seguinte é a variação das demais propriedades, térmicas e físicas (resistência térmica, condutividade térmica, transmitância térmica, calor específico, densidade e emissividade). A aba de caracterização dos materiais (quem compõem os componentes construtivos) no *DesignBuilder* apenas disponibiliza a manipulação dos valores das propriedades de condutividade térmica (λ), calor específico (c) e densidade (ρ), assim como é indicado na Figura 25.

Figura 25. Propriedades térmicas de caracterização de materiais.



Fonte: Autor (2025).

Diante das possibilidades que o *DesignBuilder* oferece, foi possível determinar quatro propriedades variáveis dentro da caracterização do componente construtivo e do material, sendo elas a distância (L) entre a parede e a fachada verde (nomeada como “camada de ar” dentro do *software*), a condutividade térmica (λ), calor específico (c) e densidade (ρ), respectivamente. Dessa forma visto que são quatro propriedades, variadas ao longo de duas condições (valor mínimo e valor máximo), é encontrado um número final de simulações para servir de base de dados, como segue a Equação 31 e 32.

$$x^n = y \quad (31)$$

Aplicando os valores reais das análises, sendo dois valores das condições fixas, dos menores aos maiores valores, variados de acordo com as propriedades físicas e térmicas das espécies classificadas nas tabelas de RSL.

$$2^4 = 16 \quad (32)$$

A partir dessas equações é possível definir o planejamento de dados que faz o controle do número de simulações, assim permitindo guiar o estudo paramétrico da pesquisa. O tratamento de dados pode ser visto a partir da Tabela 16.

Tabela 16 - Tratamento de dados para o estudo paramétrico

Simulação	λ (W/mK)	c (J/gK)	ρ (kg/m³)	L (m)
1	0,19	0,20	0,30	0,00
2	0,19	0,20	0,30	0,80
3	0,19	0,20	6,10	0,00
4	0,19	0,20	6,10	0,80
5	0,19	7,17	0,30	0,00
6	0,19	7,17	0,30	0,80
7	0,19	7,17	6,10	0,00
8	0,19	7,17	6,10	0,80
9	7,80	0,20	0,30	0,00
10	7,80	0,20	0,30	0,80
11	7,80	0,20	6,10	0,00
12	7,80	0,20	6,10	0,80
13	7,80	7,17	0,30	0,00
14	7,80	7,17	0,30	0,80
15	7,80	7,17	6,10	0,00
16	7,80	7,17	6,10	0,80

Legenda: λ = condutividade térmica do material analisado (W/mK); c = calor específico da cobertura vegetal (J/gK); ρ = densidade da cobertura vegetal (g/m³); L = distância do vão (m).

Fonte: Autor (2025).

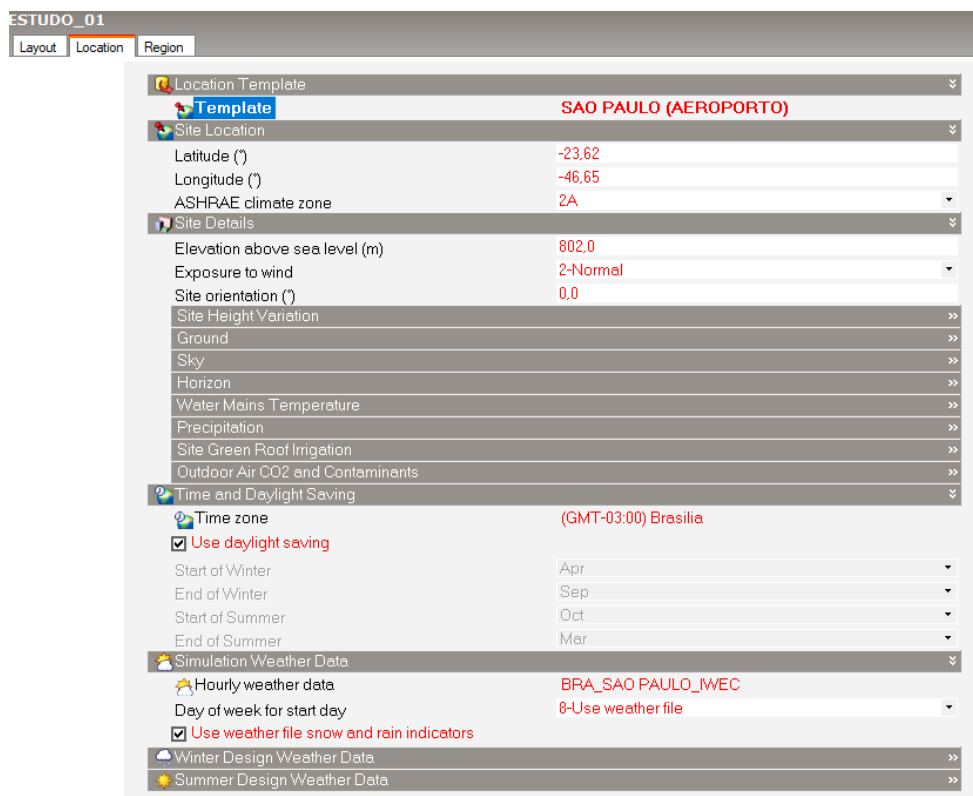
3.3 Simulações de Conforto Térmico

O último passo dentro do processo de metodologia da pesquisa foi situado na execução das simulações térmicas do modelo. Precedendo de fato as simulações, foi executada a caracterização dos *templates* de construção, assim como foi descrito na Tabela 16, foram variadas quatro propriedades em duas situações, dois extremos, de forma que cada dado contido na tabela foi inserido em seu respectivo *template* construtivo dentro do *software*, ou seja, o arquivo de nome “Estudo 01” recebeu os dados referentes a “Simulação 01”, sendo $\lambda = 0,19 \text{ W/mK}$; $c = \text{J/gK}$; $\rho = \text{kg/m}^3$ e $L = 0,00$, e assim, sucessivamente, repetindo o processo para cada um dos dezesseis estudos.

Cada “Estudo” foi desenvolvido em um arquivo separado, dessa forma, a pesquisa dispõe da análise de dezesseis arquivos, nomeados de “Estudo 01” até “Estudo 16”, essa separação foi feita para evitar gerar um arquivo único, com dezesseis modelos variados dentro de si, que poderia acarretar um aumento no peso do arquivo e, conseqüentemente, uma morosidade no processo de simulação, e esse mesmo processo poderia ser comprometido, uma vez que as dezesseis estruturas poderiam interferir nas simulações umas das outras.

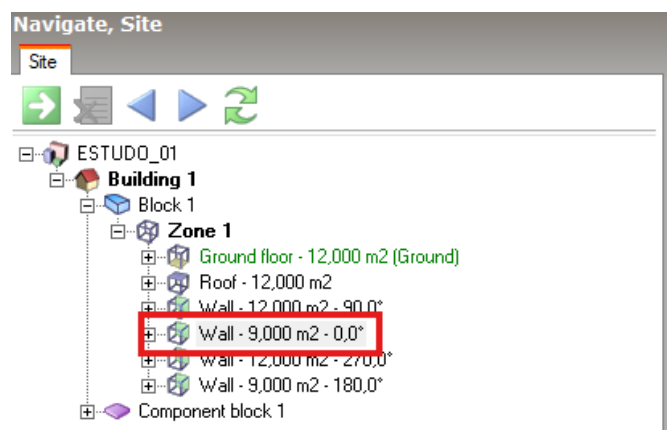
Todos os arquivos foram pré-configurados nas características as quais não sofrem alteração, como o arquivo climático geral do modelo, que se baseia no referenciamento pela região, qual foi definido na região de São Paulo, cidade capital do Estado de mesmo nome. Além desse detalhe, também definidos o posicionamento de localização que o *DesignBuilder* indica, na cidade de São Paulo, a localização é aplicada na região do aeroporto da cidade (Latitude = -23,62; Longitude = -46,65), assim como também o fuso horário da região, no caso, horário de Brasília, GMT – 03:00 (Figura 26).

Assim como o posicionamento, e a faixa de horário, outros fatores não se alteraram ao longo dos “Estudos”, como a geometria, dimensões, camadas e materiais de todos os componentes construtivos do modelo, com exceção da parede na posição da fachada ao norte, qual serve como apoio para a fachada verde. Dessa forma, os elementos estruturais como telhado, paredes convencionais em alvenaria, aberturas (esquadrias), contrapiso e laje, se mantiveram os mesmos durante todo o processo de simulações.

Figura 26. Configuração de localização, no *DesignBuilder*.

Fonte: Autor (2025).

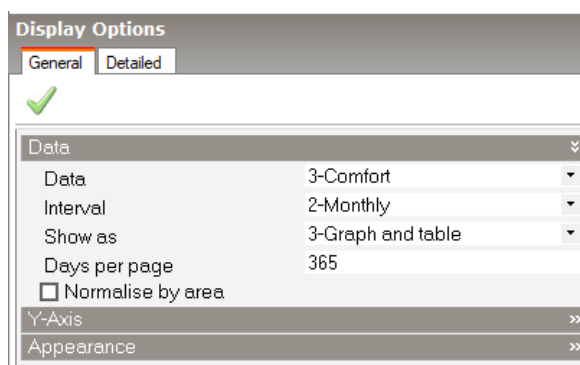
A ferramenta utilizada para separar a parede hospedeira da fachada verde, das demais paredes em alvenaria, foi a aba de navegação, no *DesignBuilder* (Figura 27). Essa funcionalidade do *software* possibilitou caracterizar apenas a parede da fachada norte (circulado na imagem), componente estrutural que foi variado ao longo das dezesseis simulações recebendo os valores da Tabela 16, de acordo com a sua numeração de chamada.

Figura 27. Aba de navegação, no *DesignBuilder*.

Fonte: Autor (2025).

Desenvolver as dezesseis simulações planejadas consistiu em um processo separar cada um dos arquivos, que compartilham suas características que não se alteram, e caracterizar o componente construtivo da parede da fachada norte (Figura 25). Em seguida, foi acessada a aba de “Simulação” em cada um dos arquivos, e configurada a disposição de análise, registrada na Figura 28.

Figura 28. Configuração primária de análise de simulação.



Fonte: Autor (2025).

Conforme apresentado na Figura 26, o tipo de informação que foi extraído das simulações é o “*comfort*” (conforto térmico), pois é justamente o âmbito de análise que apresentou a gama de temperaturas referentes ao ambiente analisado. Além do tipo de informação, também foram configurados o intervalo de apresentação de informação e seu modo de visualização. O intervalo foi definido por “*monthly*” (mensal), de forma que que cada simulação apresentou doze valores de temperaturas por cada tipo das mesmas, e a visualização da informação foi estabelecida em “*graph and table*”, ampliando o potencial de apresentação de resultados e valores, fazendo uso de um gráfico de distribuição e uma tabela com os dados transcritos, de forma a facilitar a interpretação dos resultados.

Em sequência, o outro passo de configuração da simulação, consistiu na definição do período de análise, e as datas de início e fim da mesma, de modo a gerar um período controlado e fechado para ocorrer a simulação. Assim o período definido foi o início de janeiro de 2025 (dia 01) até o fim de dezembro de 2025 (dia 31), contemplando todo o ano referente ao desenvolvimento e registro da metodologia da pesquisa (Figura 29). Estabelecer o período de análise também tem influência na dinâmica térmica do todo, uma vez que o arquivo climático geral do modelo recolhe informações climáticas do ambiente onde está referenciado o modelo a ser simulado.

Figura 29. Configuração de período de cálculo.

Edit Calculation Options

Calculation Options

General Options Output Simulation Manager

Calculation Description

Simulation Period

☐ Run simulation for sizing periods

☒ Run simulation for hourly weather

From

Start day 1

Start month Jan

☒ Specify year

Start year 2025

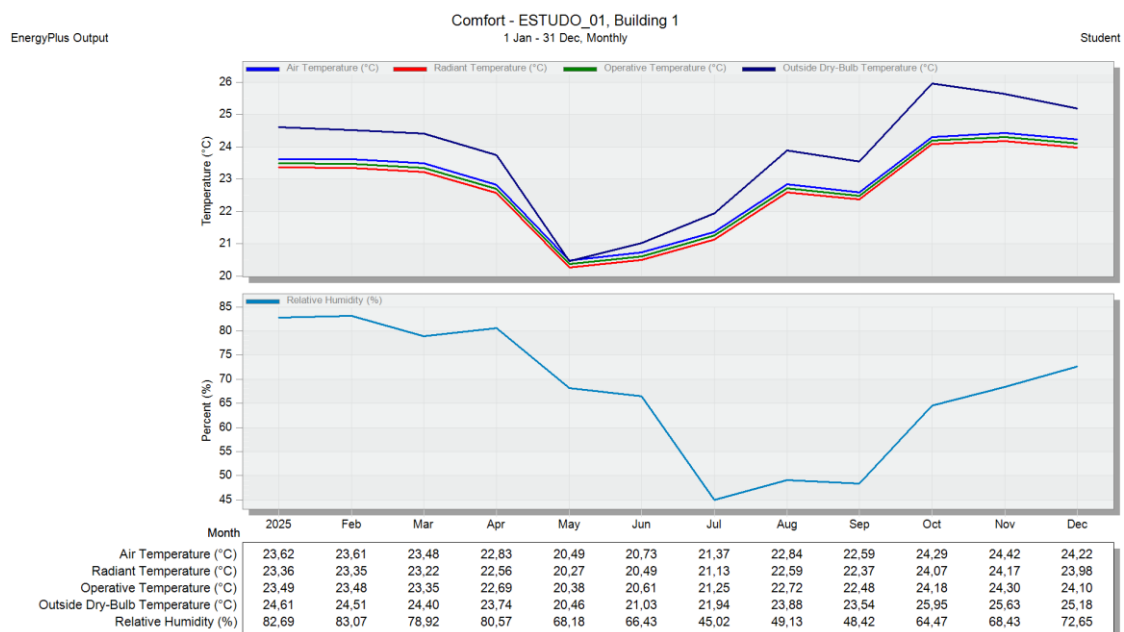
To

End day 31

End month Dec

Fonte: Autor (2025).

A confirmação das etapas citadas e registradas nas Figuras 28 e 29, automaticamente inicia o processo de simulação, contemplando as definições também previamente estabelecidas, referente ao período da simulação, seu intervalo de análise e o tipo de informação a ser extraída. Conforme é apresentado na Figura 30, é possível extrair informações sobre temperatura do ar, temperatura radiante, temperatura operativa, temperatura externa de bulbo seco e umidade relativa em valores médios referentes a cada mês do ano de 2025, e essas informações vem acompanhadas de um gráfico que indica a distribuição das temperaturas e da umidade relativa.

Figura 30. Gráfico e tabela de simulação térmica no *DesignBuilder*.

Fonte: Autor (2025).

A Figura 30 é um exemplo da apresentação dos valores de temperaturas e umidade relativa resultantes do processo de simulação pelo o DesignBuilder. Os resultados apresentados acima, foram resultantes de um modelo piloto analisado, seguindo o processo finalizado no subcapítulo 3.1.3, mais especificamente, a caracterização desse modelo usado no exemplo acima, foi baseado nas informações da Tabela 15 e da Figura 21 e 22.

3.4 Modelo de Regressão Múltipla

A análise de variância (ANOVA, 5% de significância) do modelo de regressão múltipla (Equação 33) foi considerada de maneira a avaliar, com base no diagrama de Pareto (fatores significativos situam-se à direita da linha de Pareto), a significância e a ordem de significância das variáveis independentes λ , c , ρ e L nos valores das temperaturas média (T_{med}) obtidas das 16 simulações numéricas desenvolvidas com o auxílio do software *DesignBuilder*, sendo β_i os coeficientes ajustados pelo método dos mínimos quadrados e ε é o erro aleatório.

$$T_{med} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \lambda + \beta_2 \cdot c + \beta_3 \cdot \rho + \beta_4 \cdot L + \varepsilon \quad (33)$$

Os resultados finais da pesquisa são abordados de forma mais aprofundada no capítulo seguinte (Capítulo 4, Resultados e Discussão), seguido de uma sólida discussão a respeito de como os resultados foram analisados e quais as ponderações, observações e constatações foram extraídas de tais resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados no desenvolvimento da pesquisa foram divididos em duas seções, os subcapítulos apresentados em sequência, separados de acordo com a fonte de onde foram extraídos. Dessa forma, os primeiros resultados encontrados pela pesquisa, foram originados na produção de uma RSL sobre artigos e materiais sobre estudos de jardins verticais. Posteriormente, embasado nos resultados da RSL, foram obtidos os resultados finais propostos pela pesquisa, esses os quais foram extraídos das simulações desenvolvidas no *software DesignBuilder*, de acordo com as variações das propriedades físicas e térmicas do elemento principal de estudo, a fachada verde.

4.1 Revisão Sistemática de Literatura

No subcapítulo 2.2. Revisão Sistemática de Literatura foi apresentado o fato de que a pesquisa em três das maiores bases de pesquisa e artigos científicos atuais (*Scopus*, *ScienceDirect* e *Web of Science*) resultou em apenas 233 arquivos que correspondiam *strings* de pesquisa com os termos de “fachada verde”, “propriedades térmicas”, “propriedades físicas” nos espaços gerais de títulos, palavras-chaves e resumos. Além disso esse número de arquivos contemplou 20 anos de publicações nessas bases. Esse número total de material resultante da pesquisa é significativamente pequeno perto de demais temas diversos dentro da área científica da Engenharia Civil.

Outro fator que ressalta essa escassez científica sobre pesquisar, registrar e atribuir propriedades físicas e térmicas para sistemas de jardins verticais é a filtragem dos 233 artigos e estudos iniciais para apenas 11, após uma leitura e seleção criteriosa desse material em busca de pesquisas que realmente traziam valores e indicadores de propriedades para espécies de plantas trepadeiras utilizadas em sistemas de jardins verticais.

Esse processo de filtragem, desenvolvido durante a RSL foi de suma importância para analisar, não somente, o ambiente acadêmico e científico da sustentabilidade e dos sistemas de jardins verticais na engenharia, mas também para constatar as prioridades gerais desse ambiente de pesquisa. Os autores, ao longo de pelo menos 20 anos de pesquisa, focaram muitos de seus esforços em analisar somente os ambientes de estudo, e como as fachadas verdes e paredes verdes exerciam papéis de arrefecimento e eficiência termoenergética para as estruturas e usuários, sem atribuir a devida importância a origem desses efeitos, que são as propriedades térmicas das espécies vegetais.

Diante do que foi extraído da RSL, é possível afirmar que existe uma lacuna no estudo de propriedades das cortinas verdes. Muito do âmbito científico que aborda e pesquisa essa área, se concentra em como o ambiente reage e se comporta, mas limita suas análises e não explora o comportamento e desempenho intrínseco das espécies utilizadas nos jardins verticais.

A RSL evidencia certas lacunas em algumas das propriedades, quais os autores não se atentaram ou simplesmente não realizaram experimentos e simulações que pudessem descrever tais valores. Outro importante detalhe atrelado aos autores de

pesquisas de cortinas verdes, é não definir ou escolher uma espécie base, existente, para seus estudos, apenas escalando um elemento como “cortina verde/parede verde genérica” e atribuindo valores gerais e médios encontrados em literatura.

A produção da RSL apresenta características específicas e pouco exploradas em artigos e estudos. Além disso, o estudo desenvolvido na pesquisa registrou as espécies, a partir de seus nomes científicos, e atrelou cada propriedade e seus respectivos valores, gerando uma base de dados sólida e consistente.

O outro resultado que a pesquisa oferece é um modelo caracterizado e parametrizado no *software DesignBuilder*, com uma geometria e dimensionamento baseado em NBRs, e como replicá-lo de acordo com as circunstâncias e propostas que cada autor pode ter em suas respectivas pesquisas. O modelo piloto foi caracterizado, onde nos componentes construtivos eram aplicados materiais em suas composições e os mesmos tinham propriedades e características físico-térmicas referenciadas por normas.

Os estudos mais antigos sobre sistemas de jardins verticais se baseavam inteiramente em procedimentos empíricos, experimentação em situações *in loco* e trabalhos de revisão em torno de outros estudos semelhantes. A implementação de *softwares* de projeto, análise e simulação teve seu momento em pesquisas do período de 2010 em diante, apresentando diversas vantagens em processos de avaliações de condições e propriedades físicas e térmicas. A pesquisa desenvolvida nessa dissertação se baseia nesse avanço nas pesquisas de sistemas de jardins verticais, e também aprimora e contribui para expandir esse avanço, visto que a finalização da RSL culminou numa base compilada de espécies com suas respectivas propriedades térmicas e físicas coletada por autores nos últimos 20 anos, tal base fomenta o âmbito de estudo em torno de caracterização e modelagem de sistemas de jardins verticais para futuros estudos.

Assim, a pesquisa contribui no desenvolvimento de uma base de dados consistentemente referenciadas e fundamentadas. A base de dados estabelecida pelo desenvolvimento da RSL oferece dados e informações a respeito de propriedades e características pouco exploradas e registradas sobre cortinas verdes e coberturas vegetais, além de que essas informações são vinculadas diretamente às espécies que cada autor utilizou. E a outra base de dados é o modelo piloto, que se mostra um exímio objeto de estudo para simulações e análises paramétricas que dependem das características e propriedades dos elementos construtivos aplicados no modelo.

4.2 Simulações Térmicas

O presente capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos com as simulações computacionais realizadas no *software DesignBuilder*. Utilizando como modelo piloto, um ambiente que simula um dormitório residencial, submetido à aplicação de diferentes configurações de uma parede que apoia uma fachada verde. As simulações foram conduzidas de forma paramétrica, variando-se propriedades físicas essenciais da camada vegetal e da câmara de ar adjacente, como condutividade térmica, calor específico, densidade e espessura da camada de ar. Assim, buscou-se identificar quais dessas

propriedades exercem maior influência sobre as variáveis térmicas internas, especialmente as temperaturas e a umidade, indicadores de conforto térmico.

A análise dos dados foi conduzida de forma comparativa, com o objetivo de compreender a sensibilidade do sistema térmico da edificação respondendo às diferentes configurações de fachada verde. Dessa forma quantificar os efeitos térmicos promovidos por essas variações, e também discutir os mecanismos físicos subjacentes que explicam o desempenho observado. Este capítulo, portanto, constituiu-se como a interface entre a fundamentação teórica apresentada anteriormente e os resultados computacionais obtidos por meio da simulação, estabelecendo um diálogo crítico entre teoria e prática.

Além disso, os resultados aqui apresentados contribuem para o avanço do conhecimento técnico-científico sobre o uso de elementos vegetados na eficiência térmica de construções, oferecendo subsídios para o dimensionamento adequado de fachadas verdes em projetos futuros. A relevância desses dados se estende ainda à formulação de diretrizes para definições de eficiência térmica e sustentabilidade em edificações.

Por fim, os resultados foram organizados conforme os critérios de variação das propriedades físicas analisadas, permitindo uma leitura sistemática dos efeitos térmicos associados a cada parâmetro testado.

A Tabela 17 contém os resultados das simulações dos dezesseis modelos propostos, de acordo com os dados de inserção que são apresentados na Tabela 16. Assim, foram registrados e compilados os resultados acerca das temperaturas e umidade do ambiente, diante de cada um dos dezesseis casos.

Tabela 17. Tabela de Resultado Térmico das Simulações.

Nº da Simulação	Temperatura do Ar (°C)	Temperatura Radiante (°C)	Temperatura Operativa (°C)	Umidade Relativa (%)
1	23,00	22,75	22,88	66,98
2	22,86	22,63	22,74	67,54
3	23,00	22,75	22,88	66,98
4	22,86	22,63	22,74	67,54
5	23,00	22,75	22,88	66,98
6	22,86	22,63	22,74	67,54
7	23,00	22,75	22,88	66,98
8	22,86	22,63	22,74	67,54
9	23,21	23,00	23,11	66,18
10	22,86	22,63	22,74	67,54
11	23,21	23,00	23,11	66,18
12	22,86	22,63	22,74	67,54
13	23,21	23,00	23,11	66,18
14	22,86	22,63	22,74	67,54
15	23,21	23,00	23,11	66,18
16	22,86	22,63	22,74	67,54

Fonte: Autor (2025).

No processo de simulação, os resultados foram baseados nas variáveis de saída, presentes nos gráficos e tabelas de resultados do *DesignBuilder* (Figura 30), de acordo com as variáveis de saída de temperatura do ar, temperatura radiante, temperatura operativa e umidade relativa, seguindo médios do ano de 2025 (resultante de uma equação de média dos valores de cada mês apresentado na tabela).

4.2.1 Valores de Temperatura e Umidade Relativa

A compreensão dos indicadores resultantes das simulações é importante devido a análise do desempenho térmico dos ambientes construídos. Tais parâmetros avaliados são a temperatura do ar, temperatura radiante, temperatura operativa e umidade relativa do ar, que interferem diretamente na percepção térmica dos usuários e também nos resultados numéricos das simulações.

A temperatura do ar é a medida de energia térmica do ambiente, expressada em graus celsius (°C). Esse parâmetro representa a energia cinética média das moléculas do ar, normalmente a referência principal de análises climáticas e de conforto térmico. A temperatura do ar impacta diretamente nos sistemas de climatização e é o valor mais comum nas medições e avaliações ambientais. Entretanto, quando analisada isoladamente, não representa de forma precisa a sensação térmica dos ocupantes, uma vez que desconsidera a troca de calor por radiação (ASHRAE, 2021).

A temperatura radiante (°C) por sua vez, é a média ponderada entre as temperaturas superficiais dos elementos que compõem um espaço (paredes, pavimentos, mobília e esquadrias), considerando o grau de exposição do metabolismo humano com essas superfícies. Este indicador é fundamental em ambientes com alto grau de variação de temperatura de superfícies, ou seja, com a presença de diversos materiais com propriedades térmicas com valores muito diversos e/ou distantes (ISO 7726, 2017).

A temperatura operativa (°C) é resultante média entre a temperatura do ar e a temperatura radiante, ponderando a velocidade do ar e as propriedades térmicas do espaço. Dada como uma medida mais abrangente da percepção térmica humana, pois integra os principais mecanismos de dinâmica térmica entre o metabolismo humano e o ambiente. A temperatura operativa é a principal variável, e a resultante mais sólida e precisa para a avaliação do conforto térmico de ambiente (ASHRAE Standard 55, 2020).

Por fim, a umidade relativa do ar (%) é o resultado da razão entre a quantidade de vapor d'água presente no ar e a quantidade máxima que o ar pode conter em uma determinada temperatura. Esse parâmetro tem influência na capacidade do metabolismo humano em realizar trocas de cargas térmicas por evaporação, diretamente relacionada com a sensação térmica dos ocupantes de um ambiente. Um alto valor de umidade dificulta a dissipação de calor corporal, e baixos níveis, causam desidratação e ressecamento das mucosas e da pele do corpo humano. Valores ideais para a umidade relativa do ar garantir uma condição saudável aos usuários se situa em torno de 40% e 70%, de acordo como as dimensões do ambiente e o clima da região (Oliveira *et. al*, 2021).

Dessa forma, avaliar o impacto das propriedades térmicas de um elemento estrutural, nesse caso, o sistema de jardim vertical, tem uma fundamentação mais precisa quando é analisada a temperatura operativa, como um indicador mais relevante para análises de conforto térmico. Essa resultante sintetiza os efeitos conjuntos da temperatura do ar e da temperatura radiante, altamente influenciadas pela presença de vegetação e camadas e volumes de ar em torno do ambiente analisado.

4.2.2 Análise dos Resultados das Simulações

As simulações evidenciaram a espessura da camada de ar (L) como o fator de maior influência dentro da dinâmica térmica analisada. Impactando diretamente na temperatura do ambiente, como é possível perceber nas simulações onde a camada de ar tem seu valor máximo aplicado (80 cm), com temperaturas internas mais baixas em relação as simulações que tem o valor mínimo de espessura de camada de ar (0 cm, contato direto). Essa comparação traz a tona o efeito de massa de ar como um isolamento térmico significativo, por exemplo, na situação em que a temperatura operativa caiu de 22,88 °C, nas simulações 1, 3, 5, 7, para 22,74 °C, nas simulações 2, 4, 6, 8.

Ainda analisando as simulações citadas acima, é possível perceber, que somente ocorreu variação nos valores de temperaturas onde foi aumentada ou reduzida a espessura da camada de ar (visto que compartilham do mesmo valor de λ), indicando que os valores de calor específico (c) e densidade (ρ), mesmo quando alterados entre as simulações, não interagem de forma significativa a ponto de alcançar o nível de sensibilidade de análise do *software* a ponto de indicar mudanças nas temperaturas.

Um reforço na relevância do impacto da espessura de camada de ar da fachada verde está presente nas simulações de nº 9 até 16, onde é aplicado o valor máximo de condutividade térmica (λ), a qual sofre limitação na influência da temperatura apenas nos casos onde o valor de L é zero, indicando que a temperatura do ambiente somente será alterada de acordo com os valores de condutividade térmica, uma vez que não exista uma camada de ar entre a fachada verde e a edificação.

Persistindo na análise das simulações nº 9 até 16, é possível perceber que fachadas verdes com valores superiores de condutividade térmica, apresentam aumento de temperatura interna do ambiente, apenas quando não existe uma camada de ar (Simulações 9, 11, 13, 15), do contrário, nas simulações onde existe uma camada de ar (Simulações 10, 12, 14, 16) os valores de temperatura se igualam as simulações que utilizaram o valor mínimo de condutividade térmica (Simulações 2, 4, 6, 8).

A umidade relativa seguiu o comportamento das temperaturas, em termos de conforto térmico, onde as melhores situações estão atreladas aos casos onde a espessura da camada de ar é no valor máximo (80 cm), e as piores situações, com valores inferiores, estão atrelados aos casos sem a presença da camada de ar ($L = 0$ cm). Ainda conectado com os resultados do parágrafo anterior, a condutividade térmica somente influenciará nos valores de umidade relativa, quando não existir a presença de camadas de ar.

Diante desses resultados, é possível afirmar que a variável de maior impacto é a espessura da camada de ar (L), seguido da condutividade térmica (λ), essa qual apresenta diretamente dependente da presença da primeira.

4.2.3 Análise dos resultados das simulações por meio do Gráfico de Pareto

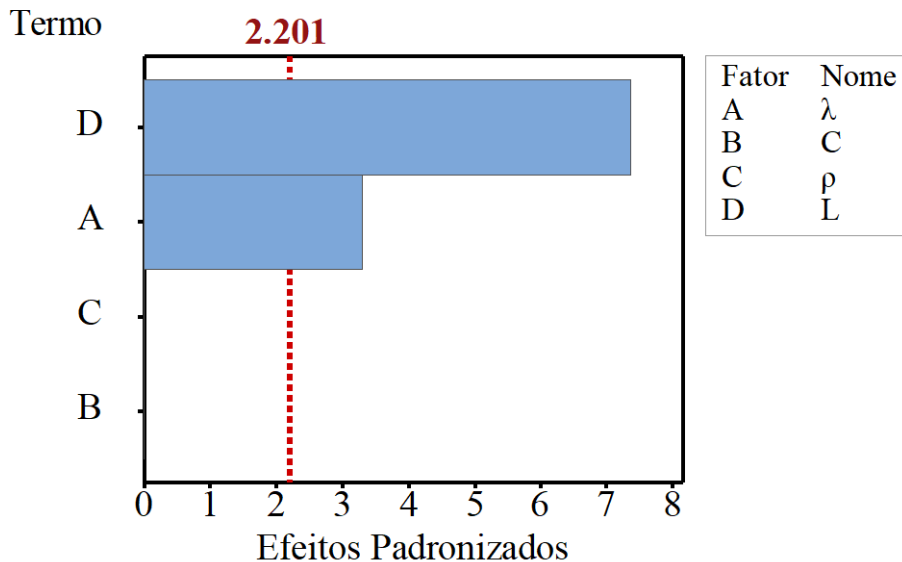
O modelo de regressão múltipla e o gráfico de Pareto obtido pela ANOVA (5% de significância) são apresentados na Equação 34 e na Figura 31.

$$T_{\text{med}} = 22.9346 + 0.01511 \cdot \lambda - 1.03 \cdot 10^{-8} \cdot c - 3.17 \cdot 10^{-9} \cdot \rho - 0.3188 \cdot L$$

$$R^2 = 85,54\%$$

34

Figura 31. Gráfico de Pareto do modelo de regressão da Equação 34.



Fonte: Autor (2025).

A análise dos resultados obtidos nas 16 simulações numéricas realizadas com o auxílio do *software* DesignBuilder permitiu investigar a significância estatística e a hierarquia de influência das variáveis independentes — condutividade térmica (λ), calor específico (c), densidade (ρ) e espessura da camada de ar (L) — sobre os valores de temperatura média do ambiente interno (T_{med}). Para isso, foram ajustados modelos

matemáticos por meio do método dos mínimos quadrados ordinários, possibilitando a determinação dos coeficientes estimados (β_i) que representam a contribuição individual de cada variável. O termo ε corresponde ao erro aleatório, assumido como normalmente distribuído e com média nula, refletindo as variações não explicadas pelo modelo. No subcapítulo a seguir, é abordada a influência das propriedades de densidade e calor específico dentro dos resultados da simulação.

4.2.4 Influência das Propriedades de Densidade e Calor Específico

Ao analisar os resultados derivados das simulações, foi possível encontrar um destaque no impacto das propriedades de densidade e calor específico no desempenho térmico do ambiente, praticamente nulo, visto que a variação dos valores dessas propriedades não apresentou interferência no conforto térmico simulado.

Para o caso da densidade, essa característica de não impactar nas condições térmicas do ambiente, pode ser atrelada ao fato de que a fachada verde é um elemento com baixa densidade, com um valor máximo de 6,10 kg/m³, considerando os valores coletados no processo de RSL. Enquanto os outros materiais, como concreto, vidro e aço, por exemplo, possuem valores de densidade em torno de 2500 kg/m³, 2200 kg/m³ e 7850 kg/m³, respectivamente.

Dessa forma, é plausível a determinação da simulação computacional registrar que a variação dos valores de densidade da fachada verde, com mínimo 0,30 kg/m³ para o máximo de 6,10 kg/m³, não gere impacto significativo no desempenho térmico de um ambiente.

O calor específico tem uma apresentação mais complexa em definir sua falta de influência dentro das simulações. O primeiro fator pode ser atrelado a uma correlação irregular entre os valores das propriedades, ou seja, o aumento ou a diminuição dos valores de calor específico não segue nenhuma relação diretamente ou inversamente proporcional com as outras propriedades térmicas de cada espécie de vegetação analisada na RSL, assim se torna extremamente limitada e impedida a avaliação profunda de como o calor específico pode ser compreendido pela leitura da simulação de conforto térmico.

Outro fator é a consideração do *DesignBuilder*, mais precisamente, de seu motor de simulação, do *EnergyPlus*, que condições de estado quase estacionário (climas com alta velocidade do ar, aberturas e ventilação e ausência de grandes massas térmicas internas) tem um impacto de capacidade térmica volumétrica limitado, com trocas energéticas de alta velocidade, impossibilitando o *software* de analisar e registrar o armazenamento de calor.

Além disso, os estudos desenvolvidos por Graça *et. al* (2019) apresentam que simulações com amplos valores de densidade e calor específico não impactam significativamente na temperatura operativa, uma vez que o material analisado representa apenas uma fração da envoltória térmica geral.

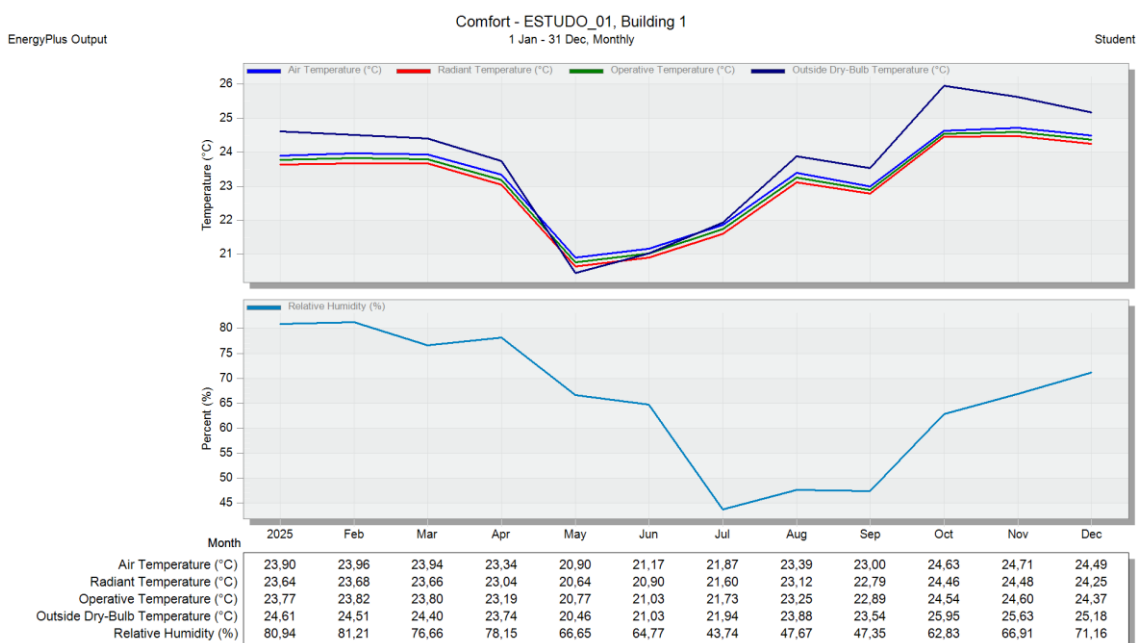
4.3 Comparativo de Casos

Fomentando os resultados das simulações e da discussão em torno da variação de desempenho térmico, foi feito um comparativo entre duas situações de simulação: 1) estudo do modelo sem a aplicação da fachada verde na alvenaria da fachada norte; e 2) estudo do modelo considerando a melhor disposição de fachada verde na fachada norte.

O Estudo 01 se baseou na modelagem com as dimensões, geometrias e valores aplicados no subcapítulo 3.1 (Modelo Piloto), seguindo todas definições estabelecidas por norma, gerando um ambiente piloto, simulando um dormitório residencial comum. O Estudo 02 se baseou de forma idêntica da modelagem do Estudo 01, entretanto, na fachada norte (fachada com maior incidência solar) foi aplicada uma fachada verde como uma camada extra no componente estrutural da parede, no *software DesignBuilder*. A fachada verde do Estudo 02 teve suas propriedades referenciadas na Simulação 02, da Tabela 17, considerando o valor de $\lambda = 0,19 \text{ W/mK}$ e $L = 0,80 \text{ m}$. A Simulação 02 foi considerada como a disposição mais ideal em questões de desempenho térmico, pois apresenta os melhores valores de temperatura operativa e umidade relativa do ar, sendo $22,74^\circ\text{C}$ e $67,54\%$, respectivamente. Além disso, a Simulação 02, se destaca das outras simulações com mesmos resultados, pois apresenta, simultaneamente, o menor valor de λ e o maior valor de L , os valores ideais para o desempenho térmico, como apresentado e discutido anteriormente.

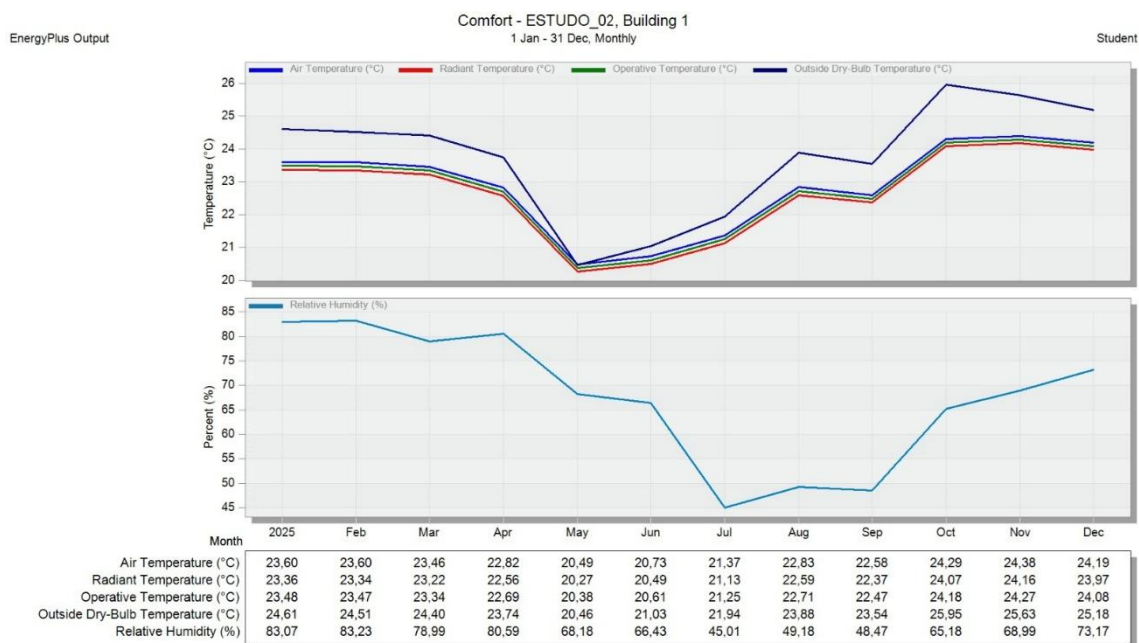
Na Figura 32 e Figura 33 estão dispostos os gráficos e tabelas numéricas resultantes das simulações feitas no *DesignBuilder*, considerando as características e definições do Estudo 01 e Estudo 02, e comparando-os, analisando paralelamente um caso sem a aplicação de fachadas verdes e um caso com a melhor disposição de fachadas verdes (diante do levantamento da RSL).

Figura 32. Estudo 01 - Sem a aplicação de fachadas verdes.



Fonte: Autor (2025).

Figura 33. Estudo 02 - Aplicação da fachada verde da Simulação 02.



Fonte: Autor (2025).

De acordo com os resultados presentes nas figuras apresentadas, é possível perceber que os valores de temperatura operativa média do Estudo 01 é de 23,15 °C, e do Estudo 02 é de 22,74 °C. Essa comparação mostra que a aplicação de fachadas verdes nas fachadas de maior incidência solar reduz em aproximadamente 0,41 °C, considerando que o ambiente de estudo foi um espaço de apenas 12 m², simulando um dormitório residencial, e o sistema de jardim vertical seguiu a geometria da edificação, apresentando uma cobertura vegetal de 9 m². Ambientes maiores, com mais esquadrias e aberturas, além de alturas funcionais superiores no ambiente, e mais importante ainda, uma fachada verde mais extensa, poderiam, exponencialmente, aumentar o efeito de fomento de desempenho térmico de um ambiente.

5 CONCLUSÕES

Em conclusão, a presente pesquisa tem sua proposta de avaliar a influência de propriedades físico-térmicas de sistemas de jardins verticais no desempenho térmico de ambientes construídos. Caracterizando as espécies de vegetação que compõem os jardins verticais e da aplicação das propriedades em simulações computacionais. Diante de um levantamento criterioso e aprofundado de estudos e pesquisas de autores que analisaram espécies de vegetação de caráter de trepadeira seguido da estruturação de uma base de dados com informações físicas e térmicas das espécies levantadas.

Diante da proposta geral da dissertação, foi possível integrar os valores de condutividade térmica, calor específico, densidade e espessura da camada de ar, vinculadas a caracterização parametrizada de sistemas de jardins verticais aplicadas em um modelo computacional desenvolvido no *DesignBuilder*. Esse processo foi o que permitiu uma análise detalhada e fundamentada dos efeitos no desempenho térmico de um ambiente que tais propriedades citadas ocasionam.

A relevância da pesquisa também se destaca na execução da revisão sistemática de literatura (RSL) que constatou uma lacuna existente em estudos de fachadas verdes, que carecem de pesquisa com objetivo de levantamento de propriedades físicas e térmicas, assim deixando esse espaço de estudo com dados limitados para trabalhos de caracterização. A RSL confirmou uma carência significativa no meio acadêmico, uma vez que de 233 trabalhos inicialmente levantados nas bases *Scopus*, *Web of Science* e *ScienceDirect*, apenas 11 deles forneceram dados aplicáveis no escopo da pesquisa proposta. Dessa forma, uma das contribuições dessa pesquisa é o fornecimento de uma base de dados com compilação de propriedades físicas e térmicas, com a identificação das espécies vegetais levantadas. O levantamento e caracterização das fachadas verdes foi o elemento principal para as simulações propostas pela pesquisa, e serviu como o elemento parametrizado para a variação de propriedades térmicas.

A execução das simulações trouxe resultados que evidenciaram que a camada de ar (L) é a variável de maior influência no desempenho térmico de um ambiente construído. Esse fato realça o efeito de isolamento térmico das massas de ar que se formam entre uma parede de alvenaria e os sistemas de jardins verticais. A condutividade térmica é a segunda propriedade de maior influência, pois tem um comportamento condicionado, uma vez que sua variação somente apresentou relevância em cenários onde o valor de L é igual a zero, ou seja, situações de contato direto entre a fachada verde e construção, sem a formação de uma camada de ar.

A comparação de casos apresentou, por meio das simulações, o impacto da espessura da camada de ar, uma vez que, nos casos que foi aplicada a espessura máxima de 80 cm, resultou em temperaturas internas consistentemente mais baixas em comparação com os cenários nos quais essa camada estava ausente ($L = 0$ cm), ou seja, em contato direto com a superfície da edificação. Destacando-se a variação da temperatura operativa, que apresentou redução (22,88 °C para 22,74 °C) nas simulações 1, 3, 5 e 7, em comparação às simulações 2, 4, 6 e 8, respectivamente. Assim, apresentando uma redução de 0,10 °C ao aumentar a espessura da camada de ar entre a construção e a fachada verde.

Por outro lado, as propriedades de densidade (ρ) e calor específico (c) apresentaram influência mínima, não significativa para as leituras do *software*. Em conexão com a literatura, é apontado que a densidade variada do elemento vegetal, por apresentar valores extremamente baixos (0,30 kg/m³ até 6,10 kg/m³), em comparação com os outros materiais do conjunto (do concreto, por exemplo, 2500 kg/m³), não influencia de forma significativa no desempenho térmico do ambiente. Já o calor específico, tem sua desconsideração dentro do sistema devido ao fato que as trocas energéticas que sofrem impacto pela capacidade térmica dos elementos acontecem mais rápido do que o motor de simulação do *DesignBuilder*, o *EnergyPlus*, consegue armazenar o calor dos materiais.

Reforçando a eficiência térmica dos sistemas de jardins verticais, ao comparar duas situações, sendo um caso sem a aplicação de fachadas verdes (Estudo 01) e o outro com os resultados da Simulação 02, de condições mais exímias (Estudo 02), foi revelado que a aplicação de sistemas de jardins verticais pode reduzir cerca de até 0,41 °C na temperatura operativa de m ambiente.

Assim, a presente pesquisa permitiu compreender de forma mais aprofundada como os mecanismos térmicos envolvidos na influência das fachadas verdes na temperatura de um ambiente. O estudo desenvolvido, da produção da RSL, dos levantamentos teóricos e técnicos em normas, condicionou a modelagem de um ambiente piloto parametrizado e replicável que justifica o uso de sistemas de jardins verticais como uma estratégia de fomento de desempenho térmico, além de evidenciar quais das propriedades tem a maior influência, além de trazer a correlação entre elas (condutividade térmica e espessura da camada de ar). A RSL e o desenvolvimento do modelo piloto garantem, tanto uma base de dados consistente e embasada, quanto um modelo parametrizado que permite diversas possibilidades de *layouts*, estruturas, materiais e propriedades a serem trabalhadas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. *NBR 13281*: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ABNT. *NBR 13529*: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ABNT. *NBR 14513*: telhas de aço com seção ondulada: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ABNT. *NBR 14514*: telhas de aço trapezoidais: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ABNT. *NBR 14931*: execução de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ABNT. *NBR 15215-1*: iluminação natural – parte 1: conceitos básicos e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ABNT. *NBR 15215-2*: iluminação natural – parte 2: procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural e para a distribuição espacial da luz natural. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ABNT. *NBR 15215-3*: iluminação natural – parte 3: procedimentos para avaliação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ABNT. *NBR 15270-1*: componentes cerâmicos – parte 1: requisitos para alvenaria. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ABNT. *NBR 15575-1*: edificações habitacionais – desempenho – parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ABNT. *NBR 6118*: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ABNT. *NBR 9050*: acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ABOUHAMAD, M.; ABU-HAMD, M. Framework for construction system selection based on life cycle cost and sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 241, p. 118397, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118397>.
- ASCIONE, F.; DE MASI, R. F.; MASTELLONE, M.; RUGGIERO, S.; VANOLI, G. P. Green walls, a critical review: knowledge gaps, design parameters, thermal performances, and multicriteria design approaches. *Energies*, v. 13, n. 9, p. 2296, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13092296>.
- ASCIONE, F.; DE MASI, R. F.; VANOLI, G. P. Energy and economic savings in buildings with green roofs: a case study for a Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, v. 182, p. 9-20, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.032>.

ASHRAE. *ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2020.

ASHRAE. *ASHRAE Handbook: fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM C177-19: standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus*. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11752: Sistemas construtivos com painéis de poliestireno expandido (EPS)*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14513: chapas e bobinas de aço revestidas – requisitos gerais*. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15220-2: desempenho térmico de edificações – parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, capacidade térmica, fator solar e atraso térmico*. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15270-1: componentes cerâmicos – requisitos para blocos e tijolos de alvenaria estrutural e de vedação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BAHARVAND, M. et al. DesignBuilder verification and validation for indoor natural ventilation. *Journal of Basic and Applied Science Research*, v. 3, n. 4, p. 8, 2013.

BAZZANO, A.; NETO, E. A. Condutividade térmica do concreto: influência da umidade e dos agregados. *Revista Matéria*, v. 21, n. 3, 2016.

BEAR, J. *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Dover Publications, 1988.

BERGMAN, T. L. et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Hoboken: Wiley, 2011.

BIANCHINI, A.; HEWAGE, K. Green roofs in sustainable landscape design. *Sustainable Cities and Society*, v. 5, p. 60-67, 2012.

BOEING, P. *Introduction to the properties of materials*. New York: Wiley, 2009.

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. *Empirical model-building and response surfaces*. New York: Wiley, 1987.

BROSSEAU, C.; TALBOT, P.; BRITTAIN, M. Modeling and numerical simulation of heat transfer in porous materials. *Journal of Applied Physics*, v. 89, n. 7, p. 3824–3832, 2001.

- BROWN, P. *Basics of evaporation and evapotranspiration*. Tucson: College of Agriculture and Life Sciences, University of Arizona, 2014.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials science and engineering: an introduction*. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2018.
- CAPENER, C.-M.; SIKANDER, E. Green building envelopes: moisture safety in ventilated light-weight building envelopes. *Energy Procedia*, v. 78, p. 3458-3464, 2015.
- CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. *Thermodynamics: an engineering approach*. 8. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- CENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- COSTA, A. F.; AMARAL, S. G. Hedera helix: usos em paisagismo e sustentabilidade urbana. *Revista Brasileira de Botânica Urbana*, v. 6, n. 3, p. 45-56, 2019.
- CRESPO, C. B.; RUSCHEL, R. C. *Ferramentas BIM: um desafio para a melhoria no ciclo de vida do projeto*. Porto Alegre, 2007.
- DA GRAÇA, G. C.; CHANG, H.-T.; LIN, T.-P. Influence of thermal mass and wall properties on the performance of ventilated façades in warm climates. *Building and Environment*, v. 151, p. 201–212, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.055>.
- DAHANYAKE, K. W. D. K. C.; CHOW, C. L. Studying the potential of energy saving through vertical greenery systems: using EnergyPlus simulation program. *Energy and Buildings*, v. 138, p. 47–59, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.002>.
- DESIGNBUILDER. *Thermal comfort analysis in buildings*. 2023. Disponível em: https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/Content/Thermal_Comfort.htm. Acesso em: 23 maio 2025.
- DÍAZ-LOPEZ, C. et al. Analysis of the scientific evolution of the circular economy applied to construction and demolition waste. *Sustainability*, v. 13, p. 69416, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13169416>.
- DJADID, A. H.; SANEI, S.; KAVEH, M. Impact of roof reflectivity on the thermal performance of residential buildings. *Energy and Buildings*, v. 215, p. 109856, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109856>.
- DU, H. et al. Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing data. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 27, p. 24–31, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.008>.
- DULLIEN, F. A. L. *Porous media: fluid transport and pore structure*. Cambridge: Academic Press, 2012.

DWAIKAT, L. N.; ALI, K. N. The economic benefits of a green building: evidence from Malaysia. *Journal of Building Engineering*, v. 18, p. 448–453, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.017>.

DWIVEDI, A.; MOHAN, B. K. Impact of green roof on microclimate to reduce urban heat island. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 10, p. 56–69, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.01.003>.

FERNANDES, L. R.; OLIVEIRA, M. A. Parthenocissus tricuspidata e seu impacto na arquitetura verde. *Arquitetura e Paisagismo*, v. 8, n. 2, p. 35-48, 2018.

FLORES LARSEN, S.; FILIPPÍN, C.; LESINO, G. Modeling double skin green façades with traditional thermal simulation software. *Solar Energy*, v. 121, p. 56–67, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.033>.

FOURIER, J. *Théorie analytique de la chaleur*. Paris: Didot, 1822.

GARCÍA, M. *et al.* Cooling potential of greenery systems for a stand-alone retail building under semiarid and humid subtropical climates. *Energy and Buildings*, v. 259, p. 111897, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111897>.

GIORIO, M.; PAPARELLA, R. A methodology to improve energy efficiency and sustainability in urban environments. *Applied Sciences*, v. 13, p. 9745, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13179745>.

HAO, X. *et al.* Influence of vertical greenery systems and green roofs on the indoor operative temperature of air-conditioned rooms. *Journal of Building Engineering*, v. 31, p. 101373, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101373>.

HODGE, B. K. *Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011.

HOLMAN, J. P. *Heat transfer*. New York: McGraw-Hill, 2010.

HOLMAN, J. P. *Heat transfer*. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

HOUGHTON, J.; DING, Y.; GRIGGS, D. *Global warming: the complete briefing*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

HOWELL, J. R.; MENGÜÇ, M. P.; SIEGEL, R. *Thermal radiation heat transfer*. Boca Raton: CRC Press, 2010.

HUSSAIN, H. A.-K. *et al.* A comparative review on greenery ecosystems and their impacts on sustainability of building environment. *Sustainability*, v. 12, p. 8529, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12208529>.

HWANG, S.; YANG, H.; LEE, D. The impact of exterior surface reflectance on the thermal performance of buildings. *Renewable Energy*, v. 112, p. 1016-1027, 2017.

IEA. *Energy efficiency 2020*. Paris: International Energy Agency, 2020.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6. ed. Hoboken: Wiley, 2007.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2011.

INCROPERA, F. P. *et al.* *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

INCROPERA, F. P. *et al.* *Fundamentals of heat and mass transfer*. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 7726: ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities*. Geneva: ISO, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 8302: thermal insulation: determination of steady: state thermal resistance and related properties: guarded hot plate apparatus*. Geneva: ISO, 1991.

JUNIOR, N. A. C. *A realidade virtual como ferramenta de projeto de sinalização na aprendizagem da arquitetura e do design*. 2007. 121 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

KANDYA, A.; MOHAN, M. Mitigating the urban heat island effect through building envelope modifications. *Energy and Buildings*, v. 164, p. 266–277, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.014>.

KASEM, M.; AMORIM, S. R. L. *Building Information Modeling no Brasil e na União Europeia*. Brasília, 2015.

KILLIAN, M.; KOZEK, M. Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings. *Building and Environment*, v. 105, p. 403–412, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.034>.

KOH, K. *et al.* Thermal comfort assessment of an office building in tropical climate condition. *MATEC Web of Conferences*, v. 225, p. 01003, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822501003>.

KOYAMA, T. *et al.* Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. *Building and Environment*, v. 66, p. 96–103, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.020>.

KREITH, F.; MANGLIK, R. M. *Principles of heat transfer*. 6. ed. Boston: Cengage Learning, 2016.

LAMBERTS, R. *Casa eficiente: simulação computacional do desempenho energético*. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010. v. 1.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. *Eficiência energética na arquitetura*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

LIU, K.; ZHANG, X. The thermal performance of green roofs in an urban environment. *Building and Environment*, v. 72, p. 141-151, 2014.

LIMÓN, R. et al. Parametric analysis using DesignBuilder to improve thermal comfort in social housing. *Journal of Building Engineering*, v. 43, p. 102555, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102555>.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. *Fundamentos de metodologia científica*. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIRASGEDIS, S. et al. Modeling framework for estimating impacts of climate change on electricity demand at regional level: case of Greece. *Energy Conversion and Management*, v. 48, p. 1737–1750, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.10.022>.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. *Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere*. Amsterdam: Elsevier, 2013.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2014.

MORRIS, K. I. et al. Computational study of urban heat island of Putrajaya, Malaysia. *Sustainable Cities and Society*, v. 19, p. 359–372, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.010>.

NGUYEN, A. T.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, v. 113, p. 1043–1058, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>.

NIACHOU, K.; KOUTIVA, I.; SANTAMOURIS, M. The contribution of green roofs to the improvement of urban microclimate. *Atmospheric Environment*, v. 35, n. 14, p. 2421–2430, 2001.

OKOLI, C. A guide to conducting a standalone systematic literature review. *Communications of the Association for Information Systems*, v. 37, n. 43, p. 879–910, 2015.

OLIVEIRA, L. C. de; SOUZA, M. M.; MOURA, A. C. A influência da umidade relativa do ar sobre o conforto térmico humano em ambientes construídos. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, v. 6, n. 1, p. 103–116, 2021.

OLIVEIRA, L. S.; PEREIRA, M. A. Propriedades térmicas do alumínio em esquadrias para edificações residenciais. *Revista de Engenharia Civil*, v. 16, n. 3, p. 75-88, 2021.

OLIVEIRA, P. R.; FREITAS, J. P.; SILVA, R. M. O feijão comum no Brasil: aspectos de cultivo e produção. *Revista de Agroecologia Brasileira*, v. 3, n. 4, p. 78-91, 2020.

OTTELÉ, M. et al. *Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems*. *Energy and Buildings*, v. 43, p. 3419–3429, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010>.

PACHECO, M. E. et al. *Plantas urbanas: espécies adequadas para fachadas verdes no Brasil*. *Revista Brasileira de Paisagismo*, v. 5, n. 2, p. 14-27, 2020.

PANDEY, A. K.; PANDEY, M.; TRIPATHI, B. D. Assessment of air pollution tolerance index of some plants to develop vertical gardens near street canyons of a polluted tropical city. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 134, p. 358–364, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.08.028>.

PENG, Q. *Modeling and daylighting design of a new window with integrated controllable louver system*. M.A.Sc. Thesis – Concordia University, Montreal, Canada, 2009.

PÉREZ, G. et al. Green façade for energy savings in buildings: the influence of leaf area index and façade orientation on the shadow effect. *Applied Energy*, v. 187, p. 424–437, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.055>.

PÉREZ, G. et al. Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy*, v. 115, p. 539–551, 2014.

PÉREZ-LÓPEZ, P. et al. Sensitivity analysis in building energy simulation: a review. *Energy and Buildings*, v. 209, p. 109705, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109705>.

PILLI-SIHVOLA, K. et al. Climate change and electricity consumption—witnessing increasing or decreasing use and costs? *Energy Policy*, v. 38, p. 2409–2419, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.12.033>.

PUGH, T. A. M. et al. Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons. *Environmental Science and Technology*, v. 46, p. 7692–7699, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1021/es300826w>.

ROSS, J. *The radiation regime and architecture of plant stands*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1981.

SAFIKHANI, T. et al. Thermal impacts of vertical greenery systems. *Environmental and Climate Technologies*, v. 14, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1515/rtuct-2014-0007>.

SAFIKHANI, T.; BAHARVAND, M. Evaluating the effective distance between living walls and wall surfaces. *Energy and Buildings*, v. 150, p. 498–506, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.029>.

SANTOS, A. F.; CARVALHO, L. S. Avaliação do desempenho de telhas termoacústicas em construções residenciais. *Revista Brasileira de Construção Civil*, v. 8, n. 3, p. 87-99, 2020.

SANTOS, L. A.; LIMA, M. R. O uso de alumínio e vidro em esquadrias: uma abordagem funcional e sustentável. *Revista de Arquitetura e Engenharia*, v. 12, n. 3, p. 87-95, 2020.

SHADRINA, A. *Framework for the transfer of building material data between the BIM and thermal simulation software*. Viena, 2015.

SHARMA, A.; SHARMA, M. P.; BHAGAT, M. S. Thermal performance of green roofs in urban heat island effect. *Journal of Environmental Management*, v. 217, p. 154-165, 2018.

SHEWEKA, S.; MAGDY, A. N. The living walls as an approach for a healthy urban environment. *Energy Procedia*, v. 6, p. 592–599, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.068>.

SIEGEL, R.; HOWELL, J. R. *Thermal radiation heat transfer*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

SIEGEL, R.; HOWELL, J. R. *Thermal radiation heat transfer*. 3. ed. New York: Taylor & Francis, 2002.

SILVA, J. P.; LOPES, A. C. Fachadas vegetadas: simulação térmica e impacto no conforto ambiental. *Revista Arquitetura Sustentável*, v. 12, n. 3, p. 45-58, 2019.

SILVA, M. R.; NASCIMENTO, S. S.; ALMEIDA, P. H. B. Análise térmica e acústica de telhas sanduíche em edificações industriais. *Revista de Engenharia e Tecnologia Aplicada*, v. 12, n. 4, p. 45-56, 2019.

SILVA, R. M.; OLIVEIRA, P. R.; FREITAS, J. P. Cultivo e potencial ecológico do *Phaseolus vulgaris*. *Revista de Agroecologia Tropical*, v. 4, n. 3, p. 78-89, 2021.

SOUZA, R. M.; CARVALHO, P. F. Esquadrias mistas: análise do desempenho térmico e acústico em edificações residenciais. *Revista Brasileira de Construção Civil*, v. 18, n. 2, p. 45-59, 2021.

SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. 3. ed. São Paulo: Elsevier, 2019.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, p. 1879–1900, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.

SUDIMAC, B. *et al.* Heat flux transmission assessment of a vegetation wall influence on the building envelope thermal conductivity in Belgrade climate. *Journal of Cleaner Production*, v. 223, p. 907-916, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.087>.

SUKLJE, T. *et al.* An inverse modeling approach for the thermal response modeling of green façades. *Applied Energy*, v. 235, p. 1447–1456, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.066>.

ŠUKLJE, T.; MEDVED, S.; ARKAR, C. An experimental study on a microclimatic layer of a bionic façade inspired by vertical greenery. *Journal of Bionic Engineering*, v. 10, p. 177-185, 2013. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(13\)60213-9](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(13)60213-9).

ŠUKLJE, T.; MEDVED, S.; ARKAR, C. On detailed thermal response modeling of vertical greenery systems as cooling measure for buildings and cities in summer conditions. *Energy*, v. 115, p. 1055-1068, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.095>.

SUNAKORN, P.; YIMPRAYOON, C. Thermal performance of biofacade with natural ventilation in the tropical climate. *International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities. Procedia Engineering*, v. 21, p. 34-41, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.1984>.

THOMAS, T.; PRAVEEN, A. Emergy parameters for ensuring sustainable use of building materials. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, p. 122382, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122382>.

TROW, T. *et al.* Is the sustainability potential of vertical greening systems deeply rooted? Establishing uniform outlines for environmental impact assessment of VGS. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 162, p. 112414, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112414>.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Energy, building technology programs*. Washington, D.C.: United States Department of Energy Building Technologies Office, 2013.

VO, T. T. *et al.* Modeling, monitoring, and validating green roof and green facade solutions with semantic city models using low cost sensors and open software infrastructures. *Urban Science*, v. 3, n. 2, p. 39, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/urbansci3020039>.

WANG, Y. *et al.* Effects of anthropogenic heat due to air-conditioning systems on an extreme high temperature event in Hong Kong. *Environmental Research Letters*, v. 13, p. 034015, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa848>.

WEAST, R. C. *Handbook of chemistry and physics*. Boca Raton: CRC Press, 1984.

WONG, N. H. *et al.* Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, v. 45, p. 663–672, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.005>.

XIAO, H. *et al.* The role of urban greenery in improving air quality and mitigating urban heat island effect: a case study of Nanjing, China. *Urban Forestry and Urban Greening*, v. 21, p. 267–278, 2017.

YANG, L. *et al.* Water-related ecosystem services provided by urban green space: a case study in Yixing city (China). *Landscape and Urban Planning*, v. 136, p. 40–51, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.016>.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *University physics with modern physics*. Boston: Pearson, 2012.

ZHOU, X.; YANG, H.; ZHANG, H. The influence of thermal transmittance on energy consumption in buildings: a case study of a residential building. *Energy Reports*, v. 4, p. 184–190, 2018.

ZHOU, Y. *et al.* Inverse estimation of unknown thermophysical properties of green facades using the Levenberg-Marquardt algorithm. *Energy and Buildings*, v. 292, p. 113179, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113179>.